

# Bachelorarbeit

## Herausforderungen und Anforderungen an Fahrzeuge für den zukünftigen automatisierten ÖPNV



Dominik Reichert

Projektleiter: Dipl.-Ing. Eva-Maria Knoch, Teilinstitut Fahrzeugtechnik

Nr.: 19-F-0069

Karlsruhe, September 2019

# Bachelorarbeit

Herrn Dominik Reichert

Matr.-Nr.:1970509

## Herausforderungen und Anforderungen an Fahrzeuge für den zukünftigen automatisierten ÖPNV

### Aufgabenstellung

*Autonom fahrende Busse bieten ein hohes Potenzial für den zukünftigen ÖPNV. Gleichzeitig haben automatisierte und autonome Fahrzeuge andere, häufig höhere Anforderungen an die Verkehrs- und IT-Infrastruktur als bisherige Fahrzeuge. Der flächendeckende Einsatz von automatisierten und autonomen Fahrzeugen im ÖPNV bedeutet, dass die bestehende Infrastruktur entsprechend modernisiert und an die neuen Bedarfe angepasst werden muss. Die Anforderungen der Fahrzeuge an die bauliche und digitale Infrastruktur ist dabei von vielen Faktoren abhängig und verändert sich mit jeder Weiterentwicklung. Gleichzeitig ändern sich die Möglichkeiten der Fahrzeuge und neue Optionen für den bedarfsgerechten Einsatz entstehen.*

*Herausforderungen, Möglichkeiten und Anforderungen müssen deshalb ständig beobachtet und neu bewertet werden. Gleichzeitig ergeben sich neue Lösungen und Konzepte können entwickelt und analysiert werden.*

#### **Die Arbeit gliedert sich in folgende Teilaufgaben:**

- *Recherche zum Stand der Technik*
- *Einarbeitung in das Themenfeld automatisiertes/autonomes Fahren*
- *Auswahl von max. drei konkreten Fallbeispielen*
  - *Fahrzeugart (Linienbus, Kleinbus, o.ä.)*
  - *Einsatzort (Großstadt, Mittelstadt, ländlicher Raum, o.ä.)*
  - *Einsatzart (Linienverkehr, on demand, o.ä.)*
- *Definition der Anforderungen an das jeweilige Fahrzeug*
  - *Anforderungen seitens der Verkehrs- und IT-Infrastruktur*
  - *Anforderungen seitens des Gesetzgebers*
  - *spezielle Anforderungen zum Einsatz im ÖPNV*
  - *ergänzende Anforderungen aus Sicht des Nutzers*
- *Entwicklung und Bewertung geeigneter Methoden zur Analyse der Fahrzeuge*
- *Analyse der gewählten Fallbeispiele anhand der zuvor entwickelten Methodik*
- *Durchführung einer SWOT-Analyse für die Fallbeispiele*
- *Ableitung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs im Bereich der Fahrzeugtechnik*

Hiermit wird die Vollständigkeit der Aufgabenstellung bestätigt. Mit ihrer/seiner Unterschrift nimmt die/der Studierende die Aufgabenstellung an und bearbeitet diese im nachstehend durch den Aus- und spätesten Abgabetag definierten Bearbeitungszeitraum. Die jeweils gültige Fassung der Studien- und Prüfungsordnung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) regelt das Verfahren insbesondere bei absehbarer Überschreitung des Bearbeitungszeitraums.

Ausgabetag: 16.05.2019

geplanter Abgabetag: 16.09.2019

tatsächlicher Abgabetag: 11.09.2019

Betreuer:

Forschungsgruppenleiter oder Betreuer  
aus der Fakultät des Bearbeiters:

---

(Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin)

---

(Prof. Dr. Kay Mitusch)

Bearbeiter:

Projektleiter am KIT (Doktorand):

---

(Dominik Reichert)

---

(Dipl.-Ing. Eva-Maria Knoch)

---

## Erklärungen

### **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbständig und nur mit den im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Des Weiteren habe ich die wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche kenntlich gemacht und die Satzung des Karlsruher Instituts für Technologie zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis in der aktuell gültigen Fassung beachtet.

Karlsruhe, den 11. September 2019

\_\_\_\_\_   
Dominik Reichert

### **Gleichstellungserklärung**

In der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit wird zur besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Dabei wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Verwendung maskuliner (Pro-) Nomen stets geschlechtsunabhängig zu verstehen ist.

---

## Kurzfassung

Das Thema der automatisierten Mobilität nimmt in der heutigen Zeit einen immer größeren Stellenwert ein. Fahrzeuge werden mit immer mehr Fahrerassistenzsystemen ausgestattet, die dem Fahrzeugsystem Fahraufgaben übertragen und den Fahrer dadurch entlasten. Dem ÖPNV ermöglichen autonom fahrende Fahrzeuge die Aufstellung eines größeren und für den Fahrgast flexibleren Angebotes sowie einen insgesamt deutlich effizienteren Betrieb. Mögliche Anwendungsszenarien erstrecken sich von autonom fahrenden Linienbussen im Stadtverkehr bis hin zu autonomen On-Demand-Kleinbussen im suburbanen Raum.

Hierfür ist eine breitgefächerte Anforderungsdefinition an die automatisierten Fahrzeuge des zukünftigen ÖPNV unerlässlich. Auf Basis dessen ist eine Bewertung von möglichen Anwendungsszenarien und ein Bewerten der Herausforderungen, vor denen diese Fahrzeuge stehen, realisierbar. Aktuell stehen die automatisierten Fahrzeuge für einen Einsatz im ÖPNV noch unbewältigten Herausforderungen gegenüber. In vielen deutschen Städten laufen daher derzeit Testprojekte mit autonom fahrenden Kleinbussen, die erste Erfahrungen im Realbetrieb sammeln. Dabei besteht nicht nur ein Interesse aus fahrzeugtechnischer Sicht, sondern auch ein Interesse von Seiten der ÖPNV-Betreiber, die mit den autonomen Kleinbussen einen neuen, automatisierten ÖPNV einleiten möchten.

---

## **Abstract**

### **Challenges and Requirements for Vehicles of Future Automated Public Transport**

At the present time, automated mobility is becoming increasingly important. Vehicles are equipped with more and more driver assistance systems, transferring driving tasks to the vehicle system and thereby relieving the driver. By means of autonomous driving vehicles, the public transport system is able to offer a greater choice and more flexibility to the passengers and is able to operate overall much more efficiently. Possible application scenarios range from autonomous driving transit buses to autonomous on-demand buses in the suburban area.

Therefore, it is essential to broadly define the requirements to be met by automated vehicles of the future public transport system. Subsequently, it is possible to evaluate possible application scenarios and to assess the challenges the vehicles have to overcome. Currently, automated vehicles to be used in public transport still face unresolved challenges. To gain experience in real operation, there are pilot projects with autonomous mini-buses in many German cities. Those projects are not only done to gain insights from an automotive engineering perspective, but also from the operators of the public transport systems who are interested in the results as they want to introduce a new automated public transport system.

---

# Inhaltsverzeichnis

Erklärungen.....	I
Kurzfassung .....	II
Abstract.....	III
Inhaltsverzeichnis.....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
1 Einleitung .....	1
1.1 Aufbau der Arbeit.....	1
2 Grundlagen des automatisierten Fahrens.....	3
2.1 Automatisierte Mobilität.....	3
2.1.1 Übergeordnete Ziele .....	3
2.1.2 Automatisierter Verkehr.....	4
2.1.3 Automatisierter ÖPNV .....	5
2.1.4 Ethik und gesellschaftlicher Dialog.....	5
2.1.5 Rechtliche Situation und Haftung .....	6
2.2 Automatisiertes Fahrzeug .....	8
2.2.1 Automatisierungsgrad .....	8
2.2.2 Fahrzeugsensoren .....	9
2.2.3 Maschinelle Wahrnehmung und Sensordatenfusion.....	14
2.2.4 Mensch-Maschine-Interaktion .....	15
2.2.5 Autonomer Bus .....	16
2.3 Infrastruktur.....	17
2.3.1 Verkehrstechnische Infrastruktur.....	18
2.3.2 Informationstechnische Infrastruktur .....	18
2.3.2.1 Vernetztes Fahren.....	19
2.3.2.2 Kommunikation und Datenaustausch .....	20

---

2.3.2.3	Daten und Datenschutz .....	21
2.3.2.4	Digitale Referenzkarte .....	22
3	Aktueller Stand des automatisierten Fahrens .....	23
3.1	Stand der Technik.....	24
3.2	Stand der Forschung .....	25
3.3	Stand automatisierter Kleinbusse im ÖPNV .....	26
4	Fallstudien.....	28
4.1	Fallstudie 1: Urbaner Linienverkehr.....	29
4.1.1	Anforderungen aus Nutzersicht .....	30
4.1.2	Fahrzeugtechnische Anforderungen .....	31
4.1.3	Infrastrukturelle Anforderungen .....	33
4.1.4	Anforderungen des ÖPNV .....	34
4.1.5	Rechtliche Anforderungen.....	35
4.2	Fallstudie 2: Urbaner On-Demand Verkehr .....	37
4.2.1	Anforderungen aus Nutzersicht .....	38
4.2.2	Fahrzeugtechnische Anforderungen .....	40
4.2.3	Infrastrukturelle Anforderungen .....	41
4.2.4	Anforderungen des ÖPNV .....	43
4.2.5	Rechtliche Anforderungen.....	44
4.3	Fallstudie 3: Suburbaner Zu- und Abbringerverkehr On-Demand.....	46
4.3.1	Anforderungen aus Nutzersicht .....	47
4.3.2	Fahrzeugtechnische Anforderungen .....	48
4.3.3	Infrastrukturelle Anforderungen .....	49
4.3.4	Anforderungen des ÖPNV .....	50
4.3.5	Rechtliche Anforderungen.....	51
5	Fallstudienanalyse.....	52
5.1	Methoden der Fallstudienanalyse .....	52
5.1.1	Methode 1: Direktes Vergleichsverfahren.....	52



---

5.1.2	Methode 2: Gewichtetes Rangfolgeverfahren.....	54
5.1.3	Methode 3: Nutzwertanalyse.....	55
5.1.4	Methodenauswahl.....	57
5.2	Fallstudienanalyse.....	58
5.2.1	Kriterium 1: Nutzersicht.....	59
5.2.2	Kriterium 2: Fahrzeugtechnik.....	62
5.2.3	Kriterium 3: Infrastruktur.....	64
5.2.4	Kriterium 4: ÖPNV.....	67
5.2.5	Auswertung.....	69
5.3	SWOT-Analyse der Fallstudien.....	70
5.3.1	Fallstudie 1.....	70
5.3.2	Fallstudie 2.....	73
5.3.3	Fallstudie 3.....	76
6	Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich der Fahrzeugtechnik.....	79
7	Schlusswort.....	81
8	Literaturverzeichnis.....	82

---

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Fahrzeugsensoren eines automatisierten Fahrzeuges zur Erkennung von Hindernissen in der Fahrzeugumgebung [22] .....	10
<b>Abbildung 2:</b> Shuttle-Bus des Herstellers Navya inklusive Sichtfelder der Fahrzeugsensoren [29] .....	16
<b>Abbildung 3:</b> Voraussichtliche Einführungszeiträume automatisierter Fahr- und Parkfunktionen nach dem Verband der Automobilindustrie [33, p. 15] .....	23
<b>Abbildung 4:</b> Liniennetz des ÖPNV, auf dem die autonomen Linienbusse aus Fallstudie 1 verkehren (Straßenkarte aus [42]) .....	29
<b>Abbildung 5:</b> Die roten Linien stellen das Verkehrsnetz des ÖPNV dar, auf dem die autonomen Kleinbusse aus Fallstudie 2 verkehren (Straßenkarte aus [42]) .....	38
<b>Abbildung 6:</b> Verkehrsnetz des ÖPNV. Die blauen Linien stellen ein stationäres Liniennetz dar; die roten Bereiche werden von den autonomen Kleinbussen aus Fallstudie 3 abgedeckt und sind über die eingezeichneten roten Punkte mit dem stationären Liniennetz verbunden (Straßenkarte aus [42]) .....	46

---

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Vergleich der verschiedenen Umfeldsensoren in Bezug auf Objekterkennung und -klassifizierung sowie Reichweite und Anfälligkeit gegenüber Nebel und Regen (Witterungsresistenz) mit dem Bewertungshorizont gut / mittel / schlecht. In Anlehnung an [27, p. 2].....	13
<b>Tabelle 2:</b> Schema von Methode 1 (Direktes Vergleichsverfahren).....	53
<b>Tabelle 3:</b> Schema von Methode 2 (Gewichtetes Rangfolgeverfahren).....	55
<b>Tabelle 4:</b> Schema von Methode 3 (Nutzwertanalyse).....	56
<b>Tabelle 5:</b> Gewichtungen der Kriterien für die Fallstudienanalyse.....	59
<b>Tabelle 6:</b> Auswertung der Fallstudienanalyse.....	69
<b>Tabelle 7:</b> SWOT-Analyse der Fallstudie 1.....	73
<b>Tabelle 8:</b> SWOT-Analyse der Fallstudie 2.....	76
<b>Tabelle 9:</b> SWOT-Analyse der Fallstudie 3.....	78

---

## Abkürzungsverzeichnis

a.d.E.	aus dem Englischen
Alternat.	Alternative
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
bzw.	beziehungsweise
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
KI	Künstliche Intelligenz
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
StVO	Straßenverkehrsordnung
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
vgl.	vergleiche
V2I	Fahrzeug-zu-Infrastruktur (Vehicle-to-Infrastructure)
V2V	Fahrzeug-zu-Fahrzeug (Vehicle-to-Vehicle)
V2X	Fahrzeug-zu-X (Vehicle-to-X)

# 1 Einleitung

Die Idee von einem fahrerlosen, selbstfahrenden Automobil ist keine völlige Neuerscheinung. Bereits im Jahr 1921 wurde in Dayton (Ohio, USA) der Öffentlichkeit ein fahrerloses Fahrzeug präsentiert, das zwar noch von einem nachfolgenden Fahrzeug ferngesteuert werden musste, aber dennoch als erstes fahrerloses Automobil in die Geschichte einging. Auch in den darauffolgenden Jahren des 20. Jahrhunderts wurde das selbstfahrende Automobil immer mehr zur „Zukunftsvision“. Im Jahr 1938 entstand die sogenannte Leitdrahtvision, der zufolge die Fahrzeuge der Zukunft selbstständig einem in der Fahrbahn verbauten elektromagnetischen Kabel folgen würden. Wie auch heute war einer der ausschlaggebenden Aspekte für diese Vision die Erhöhung der Verkehrssicherheit [1].

Heute, im Jahr 2019, sind Fahrzeuge bereits mit Spurhalteassistenten, sensorgesteuerter Umfeldwahrnehmung mit Kollisionsschutz und vielen weiteren praktischen Assistenzsystemen ausgestattet, die für mehr Sicherheit sowie einen geringeren Treibstoffverbrauch und somit für eine geringere Umweltbelastung sorgen [2]. Was in der Entwicklung von Fahrerassistenzsysteme zur Umfeldwahrnehmung ihren Ursprung nahm beschäftigt die Automobilindustrie zurzeit als nächste Ausbaustufe des automatisierten Fahrens: die Hochautomatisierung. Bei dieser übernimmt das Fahrzeug in einem speziellen Anwendungsfall alle Fahraufgaben vorübergehend selbstständig, ohne dass der Fahrer dem Fahrgeschehen folgen muss [3].

Doch diese Entwicklung beschränkt sich keinesfalls nur auf Personenkraftwagen, sondern findet auch bei Nutzfahrzeugen wie Bussen und Lastkraftwagen, gerade in Bezug auf den Aspekt der Verkehrssicherheit, große Relevanz. Dabei sind fahrerlose Nutzfahrzeuge schon lange keine Zukunftsvision mehr; so gehören bereits heute automatisierte Erntemaschinen, fahrerlose Transporteinheiten am Tagebau oder selbstfahrende Shuttle-Busse, wie beispielsweise am Frankfurter Flughafen, zur alltäglichen Realität [4].

## 1.1 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit beschäftigt sich mit den Herausforderungen und Anforderungen automatisierter Fahrzeuge des Öffentlichen Personennahverkehrs (kurz ÖPNV). In Kapitel 2 werden zunächst die Grundlagen der automatisierten Mobilität im Allgemeinen sowie die Grundlagen automatisierter Fahrzeuge und der Infrastruktur betrachtet. Aus technischer Sicht spielt es keine gravierende Rolle, ob dabei von Personenkraftwagen oder Nutzfahrzeugen wie

Bussen die Rede ist, da diese auf denselben technischen Grundlagen beruhen. Daher wird zunächst die Automatisierung von Fahrzeugen im Allgemeinen betrachtet. Anschließend wird in Kapitel 3 ein kurzer Überblick über den aktuellen Stand der Technik und Forschung dargeboten.

In Kapitel 4 folgt eine Vorstellung von drei Fallstudien, die sich explizit mit automatisierten Fahrzeugen im ÖPNV beschäftigen. In einer darauffolgenden Auseinandersetzung mit diesen Fallstudien werden die aktuellen Anforderungen an automatisierte Fahrzeuge im ÖPNV herausgearbeitet. Auf Basis dieser Anforderungen wird in Kapitel 5 eine Fallstudienanalyse für jede der drei Fallstudien durchgeführt, in der die Herausforderungen, vor denen die Fahrzeuge der drei Fallstudien stehen, bewertet werden. Des Weiteren wird für jede Fallstudie eine SWOT-Analyse durchgeführt.

Abschließend folgt in Kapitel 6 zusammenfassend eine aus den Anforderungen und Herausforderungen abgeleitete Auflistung von Forschungs- und Entwicklungsbedarfen.

## 2 Grundlagen des automatisierten Fahrens

In diesem Kapitel werden die Grundlagen des automatisierten und vernetzten Fahrens erarbeitet, aus denen anschließend die Anforderungen und Herausforderungen an automatisierte Fahrzeuge des ÖPNV abgeleitet werden.

### 2.1 Automatisierte Mobilität

Mit der Automatisierung von Fahrzeugen entsteht eine neue Art der Mobilität. Die automatisierte Mobilität orientiert sich an grundlegenden Zielen, wird Änderungen im Verkehr und ÖPNV mit sich ziehen und stößt auf ethische und rechtliche Problemstellungen. Diese Punkte werden im Folgenden erläutert.

#### 2.1.1 Übergeordnete Ziele

Die Kernargumente für die Automatisierung von Fahrzeugen im Straßenverkehr lassen sich neben dem Argument der Entwicklung neuer technischer Innovationen in vier übergeordnete Ziele zusammenfassen: die Erhöhung der Verkehrssicherheit, die Verbesserung der Verkehrseffizienz, die Reduzierung verkehrsbedingter Emissionen und die Verbesserung der Flexibilität.

Die Erhöhung der **Verkehrssicherheit** ist für viele Länder eines der wichtigsten Ziele. Gerade die USA mit jährlich über 30.000 Verkehrstoten setzt ihr Hauptaugenmerk auf mehr Sicherheit im Straßenverkehr [5]. Laut dem Statistischen Bundesamt waren 2015 über 90 % der Unfälle auf menschliches Fehlverhalten zurückzuführen und weniger als 1 % auf technische Mängel [6]. Genau an diesem Punkt setzt die Automatisierung von Fahrzeugen zur Steigerung der Verkehrssicherheit an. Schon heute bieten Fahrzeughersteller dafür Fahrerassistenzsysteme an, die die Fahrer insbesondere in kritischen Fahrsituationen unterstützen.

Gerade bei einem immer weiter ansteigenden Verkehrsaufkommen spielt die Erhöhung der **Verkehrseffizienz** ebenfalls eine große Rolle. Laut einer Verkehrsprognose des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (kurz BMVI) für das Jahr 2030 wird der Personenverkehr um 13 % und der Güterverkehr um 38 % ansteigen. Dabei kann durch automatisiertes Fahren aufgrund einer abgestimmten Fahrweise und Navigation eine wesentliche Optimierung des Verkehrsflusses hervorgerufen werden, welcher durch eine Vernetzung der Fahrzeuge mit Signalanlagen und anderen Verkehrsteilnehmern noch weiter optimiert werden kann [7]. Unter anderem

durch die Verringerung der Sicherheitsabstände und einer gleichmäßigen Geschwindigkeitsregelung innerhalb eines Fahrzeugpulses kann in einem rein autonomen Verkehr eine Kapazitätserhöhung von rund 40 % in Städten und etwa 80 % auf Autobahnen erwartet werden [5].

Ganz besonders beschäftigt die Automobilindustrie derzeit die Reduzierung verkehrsbedingter **Emissionen**. Auch hier stellt die Automatisierung von Fahrzeugen ein großes Potenzial dar. Gerade der zähfließende Stadtverkehr oder Staus auf der Autobahn sind Ursachen für einen erhöhten Kraftstoffverbrauch, der mit erhöhten Emissionswerten einhergeht. Durch eine Vernetzung der Fahrzeuge untereinander und einer intelligenten Verkehrsführung können Emissionen deutlich reduziert werden [7]. Auch die mit der Automatisierung oft gekoppelte Elektrifizierung stellt hier ein Emissions-Einsparpotenzial dar.

Mit der Automatisierung von Fahrzeugen bis hin zu autonomen, selbstfahrenden und fahrerlosen Fahrzeugen entsteht für die Fahrzeuginsassen ein erhöhtes Maß an **Flexibilität**. Dadurch erschließen sich zusätzlich neue Nutzergruppen, wie beispielsweise Kinder, ältere Menschen oder Menschen mit einer körperlichen Behinderung, für die das Führen eines Fahrzeuges derzeit nicht möglich ist [6].

### 2.1.2 Automatisierter Verkehr

Es stellt sich für die Planung des automatisierten Verkehrs der Zukunft grundsätzlich die Frage, ob sich die Stadt dem automatisierten Verkehr oder der automatisierte Verkehr sich der Stadt anpassen wird [8]. Zu beachten ist dabei, dass der automatisierte Verkehr nicht von heute auf morgen ausschließlich aus selbstfahrenden, fahrerlosen Fahrzeugen bestehen wird. Es werden Einführungsstrategien benötigt, die in der Übergangsphase einen gemischten Verkehr aus automatisierten und nicht-automatisierten Fahrzeugen berücksichtigen.

Zwei weit verbreitete Konzepte sind zum einen die Trennung des automatisierten Verkehrs vom nicht-automatisierten Fahrverkehr (wie nicht-automatisierte Fahrzeuge, Fahrradfahrer und Fußgänger), was allerdings eine sehr große Einschränkung im öffentlichen Raum mit sich führt. Zum anderen besteht die Möglichkeit der gemeinsamen Nutzung der Verkehrsflächen – ein gemischter Verkehr aus automatisierten und nicht-automatisierten Verkehrsmitteln inklusive Fahrzeugen unterschiedlicher Automatisierungsgrade [8].



### 2.1.3 Automatisierter ÖPNV

Gerade für den ÖPNV bietet die Automatisierung und Vernetzung von Fahrzeugen ein großes Potenzial. Neben den ökonomischen Gesichtspunkten für die Betreiber entsteht vor allem die Chance, das Nahverkehrsangebot flexibler und individueller zu gestalten [6].

Durch fahrerlose Kleinbusse entfällt für den ÖPNV die Bündelungsnotwendigkeit der verschiedenen Bus- und Bahnlinien. Die Kleinbusse können als Zu- und Abbringer von zentralen Bus- und Bahnlinien fungieren, den ÖPNV somit näher zu den Kunden bringen und letztendlich eine schnellere Linienführung mit insgesamt kürzeren Reisezeiten realisieren [9]. Insbesondere rückt bei dieser Perspektive der Begriff „Letzte Meile“ in den Fokus [10]. Mit diesem Begriff wird sich vor allem auf die Erschließung von nur schwach bis gar nicht vom ÖPNV abgedeckten Gebieten bezogen, was gerade im suburbanen Raum zu einer erhöhten Flexibilität führt. Dem schließt sich auch das Konzept der sogenannten Automated Mobility On-Demand (AMOD) an, bei dem die fahrerlosen Kleinbusse des ÖPNV den Kunden von der Haustür bis hin zu seinem gewünschten Ziel bringen, wann immer er es möchte [5].

Auch wenn diese Konzepte noch sehr theoretisch klingen, sind sie ein wesentlicher Bestandteil des automatisierten ÖPNV und werden bei entsprechendem technischen Fortschritt für den Kunden und Betreiber einen erheblichen Mehrwert schaffen.

Einen ersten Vorgeschmack auf den automatisierten ÖPNV der Zukunft kann man seit Oktober 2017 in der niederbayerischen Kleinstadt Bad Birnbach gewinnen. In Zusammenarbeit mit der Firma ioki, einem Tochterunternehmen der Deutschen Bahn, und dem Fahrzeughersteller Easy-Mile entstand dort die erste Buslinie Deutschlands mit autonom fahrenden Bussen [11]. Mit der im August 2018 eröffneten Erweiterung kann heute auf einer Strecke von 1.400 Metern mit vier Haltestellen und einer Fahrdauer von 12 Minuten autonom mitgefahren werden [11]. Der Bus folgt dabei einer im Vorfeld einprogrammierten Route und bewegt sich somit wie auf Schienen [12]. Aus rechtlichen Gründen befindet sich stets ein Begleiter der Deutschen Bahn mit an Bord, der nach jedem Anhalten das Shuttle manuell per Knopfdruck wieder in Bewegung setzen muss [13].

### 2.1.4 Ethik und gesellschaftlicher Dialog

Die *Ethik-Kommission Automatisiertes und Vernetztes Fahren* des BMVI hat sich intensiv mit ethischen Fragestellungen in Bezug auf das automatisierte und vernetzte Fahren auseinandergesetzt, auf welche hier nicht genauer eingegangen wird. Im Folgenden werden kurz einzelne ethische Fragestellungen aufgegriffen, die für die technische Betrachtung von Bedeutung sind

und die Relevanz ethischer Fragestellungen im Kontext des automatisierten Fahrens verdeutlichen sollen.

Wie ist das Wertesystem eines automatisierten Fahrzeuges zu implementieren? Ein Mensch nimmt als Fahrer eines Fahrzeuges in Gefahrensituationen Güterabwägungen vor, wie beispielsweise das Überfahren einer durchgezogenen Linie, wenn dadurch ein Unfall vermieden werden kann. Was dem Leser womöglich völlig logisch erscheint, stellt das automatisierte Fahrzeug vor eine sehr schwierige Entscheidung: welche Regel darf es in welcher Situation ignorieren? Noch schwieriger fällt die Entscheidung für das Fahrzeug aus, wenn es sich um eine Dilemma-Situation handelt – wenn also ein Unfall nicht mehr vermieden werden kann. Zugunsten und zulasten welches Verkehrsteilnehmers soll sich das Fahrzeug in Extremsituationen entscheiden [3]?

Ein bekanntes Problem stellt hierbei das „Das Kind und ich – das Tunnel-Problem“ [5, p. 30] von Philosoph Jason Millar dar. Ein automatisiertes Fahrzeug fährt auf einer engen Straße geradewegs auf eine Tunneleinfahrt zu, wo plötzlich ein Kind auf die Fahrbahn tritt. Eine Bremsung ohne dabei das Kind zu verletzen ist nicht mehr möglich. Das Fahrzeug kann entweder ausweichen, wodurch die Insassen des Fahrzeuges bei der Kollision mit der Tunnelwand tödlich verunglücken, das Kind jedoch unversehrt bleibt, oder das Fahrzeug überfährt und tötet das Kind und rettet damit die Fahrzeuginsassen [5]. Die Antwort auf diese Frage muss letzten Endes von Entwicklern in die Software des Fahrzeuges implementiert werden [3].

Neben der ethischen Diskussion hat auch der gesellschaftliche Dialog im Kontext des automatisierten Fahrens einen hohen Stellenwert. Gerade die Einführung des hoch- und vollautomatisierten Fahrens führt zu tiefgreifenden Veränderungen im gesamten Verkehrssystem. Da hiervon alle am Verkehr teilnehmenden Personen betroffen sind, ist ein tiefgreifender Dialog mit der Gesellschaft und eine daraus resultierende, zwingend erforderliche gesellschaftliche Akzeptanz unumgänglich [3]. Gerade in Bezug auf den ÖPNV hat dieser Dialog oberste Priorität, da ohne die Akzeptanz der Fahrgäste die Automatisierung des Nahverkehrs zwecklos ist.

### **2.1.5 Rechtliche Situation und Haftung**

Nach aktuellem Stand sind fahrerlose Fahrzeuge auf öffentlichen Straßen in Deutschland mit dem Gesetz nicht vereinbar [6]. Grund dafür ist hauptsächlich das Wiener Übereinkommen aus dem Jahr 1968, nach dem der Fahrer des Fahrzeuges stets die Kontrolle über das Fahrzeug haben muss. Wörtlich heißt es in Artikel 8 Absatz 5: „Jeder Führer muß dauernd sein Fahrzeug beherrschen“ [14, p. 13]. Demnach ist ein autonomes Fahrzeug ohne Lenkrad oder Gas- und Bremspedal im Straßenverkehr nicht erlaubt. Am 21. Juni 2017 trat das *Achte Gesetz zur Änderung des*

*Straßenverkehrsgesetzes* in Kraft, das erstmals grundlegende Regeln für hoch- und vollautomatisierte Fahrzeuge und der damit einhergehenden Fahrer-Fahrzeug-Beziehung festlegt [15]. In Artikel 1 § 1b Absatz 1 heißt es wörtlich:

*„Der Fahrzeugführer darf sich während der Fahrzeugführung mittels hoch- oder vollautomatisierter Fahrfunktion [...] vom Verkehrsgeschehen und der Fahrzeugsteuerung abwenden“* [16, p. 1].

Nach Artikel 1 § 1b Absatz 2 heißt es jedoch auch:

*„Der Fahrzeugführer ist verpflichtet, die Fahrzeugsteuerung unverzüglich wieder zu übernehmen, [...] wenn er [...] auf Grund offensichtlicher Umstände erkennen muss, dass die Voraussetzungen für eine bestimmungsgemäße Verwendung der hoch- oder vollautomatisierten Fahrfunktion nicht mehr vorliegen“* [16, pp. 1-2].

Daraus geht hervor, dass die rechtliche Situation weiterhin nicht vollends geklärt ist. Der Fahrer darf sich laut dem ersten Absatz zwar vom Fahrgeschehen abwenden, muss gemäß des zweiten Absatzes aber auch beim Auftreten nicht weiter definierter „offensichtlicher Umstände“ die Fahraufgabe sofort wieder übernehmen.

Damit einher geht die aktuell noch ungeklärte Haftung. In Deutschland baut die Haftung bei Unfällen auf einem Drei-Säulen-Modell auf: Fahrer, Halter und Hersteller [17]. Ab dem hochautomatisierten Fahren ist das Fahrzeug in bestimmten Situationen allerdings alleine für die Ausführung aller Fahraufgaben verantwortlich (genauer folgt in Kapitel 2.2.1). Eine genaue Einbeziehung des automatisierten Fahrzeuges in das Haftungskonzept und die Klärung der Frage, ob und inwieweit ein selbstfahrendes Fahrzeug Schuld haben kann, ist daher unerlässlich und steht noch offen [5].

Mit dem Gesetz unvereinbar bleibt weiterhin die Nutzung autonomer, fahrerloser Fahrzeuge. Es existieren allerdings Ausnahmegenehmigungen nach § 70 der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (kurz StVZO), wonach beispielsweise autonome Shuttle-Busse unter bestimmten Voraussetzungen am öffentlichen Straßenverkehr teilnehmen dürfen. Das Land Baden-Württemberg kann eine solche Ausnahmegenehmigung erteilen, wenn gewisse Nebenbestimmungen erfüllt sind. Dazu zählen unter anderem, dass das Shuttle auf einem konkret beschriebenen Streckenabschnitt fährt, nur bei geeigneten Sicht- und Witterungsbedingungen in Betrieb ist, Höchstgeschwindigkeit und Einsatzzeit festgelegt werden, eine Haftpflichtversicherung abgeschlossen ist und eine Begleitforschung durchgeführt wird [18].

## 2.2 Automatisiertes Fahrzeug

Ein automatisiertes Fahrzeug besitzt drei grundlegende Aufgaben: es muss seine Umgebung erfassen, anhand dieser Informationen und zusätzlichen Informationen der Infrastruktur eine Fahrzeugstrategie ableiten sowie diese letztendlich sicher ausführen [19].

Der größte Anteil der Komplexität automatisierter und vernetzter Fahrzeuge fällt auf die Software zurück. Wohingegen das Steuermodul der Apollo 11 Mondkapsel über eine Software mit rund 145.000 Zeilen Quellcode verfügte, fallen in heutigen Fahrzeugen der Oberklasse inklusive aktueller Fahrerassistenzsysteme über 80 Millionen Zeilen Quellcode an. Dabei steigt die Fehleranzahl proportional zu der Anzahl an Quellcodezeilen [20]. Die Fähigkeiten eines automatisierten Fahrzeuges hängen letztendlich von der Leistungsfähigkeit der Algorithmen ab, die die gesamten Daten aus Sensoren und Infrastruktur verarbeiten.

### 2.2.1 Automatisierungsgrad

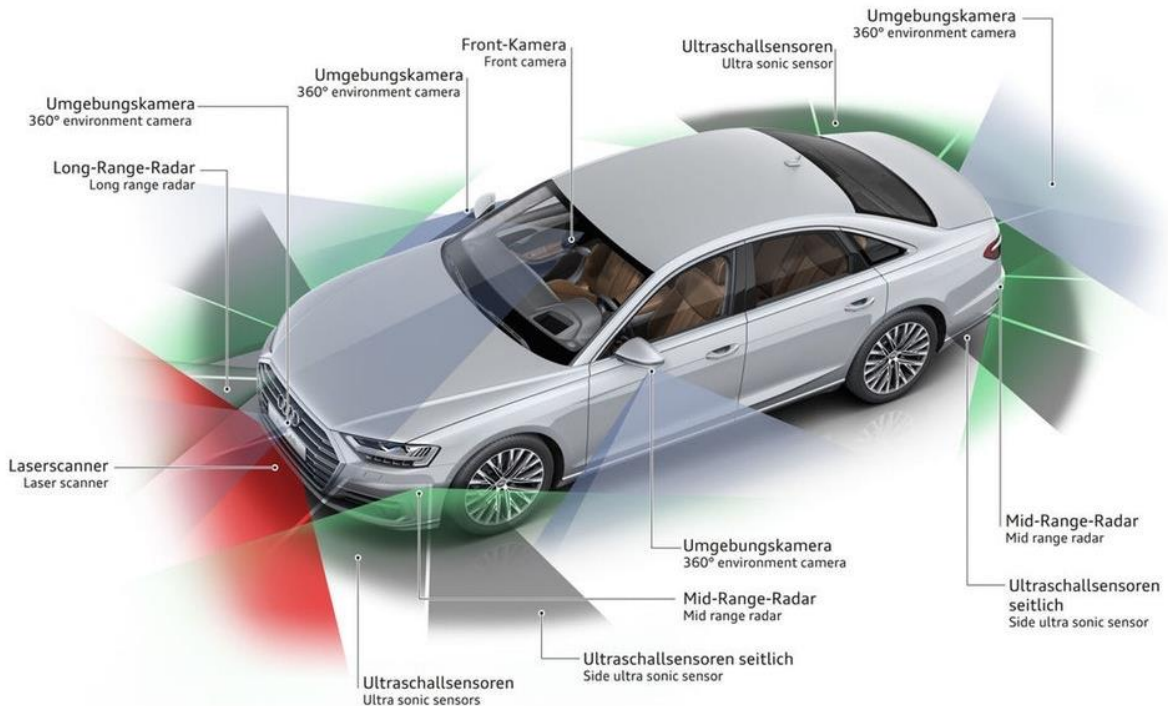
Um ein einheitliches Verständnis bei Diskussionen über die unterschiedlichen Automatisierungsgrade von automatisierten Fahrzeugen zu gewährleisten, hat die *Society of Automotive Engineers International* 2016 die unterschiedlichen Automatisierungsgrade in der Norm *SAE J306* in einem Sechs-Stufen-Modell klassifiziert, das weltweit verwendet wird [4].

- ▶ **Stufe 0** klassifiziert das **Fahren ohne Assistenzsysteme**. In dieser Stufe führt der Fahrer während der gesamten Fahrt dauerhaft die Längs- und Querführung des Fahrzeuges aus. Es ist kein Fahrzeugsystem im Fahrzeug vorhanden, das in das Fahrgeschehen eingreifen kann [4]. Zu dieser Stufe gehören auch Fahrzeuge mit Systemen wie dem Antiblockiersystem (ABS) oder dem Elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP), welche den Fahrer im Hintergrund unterstützen [2].
- ▶ **Stufe 1** klassifiziert das **assistierte Fahren**. Der Fahrer führt für einen gewissen Zeitraum entweder die Längs- oder Querführung des Fahrzeuges aus, die jeweils andere Fahraufgabe übernimmt das Fahrzeug selbstständig [4]. Es ist dennoch zwingend erforderlich, dass der Fahrer das System dauerhaft überwacht und jederzeit die Kontrolle über das Fahrzeug einnehmen kann [2].
- ▶ **Stufe 2** klassifiziert das **teilautomatisierte Fahren**. Das Fahrzeugsystem übernimmt für einen speziellen Anwendungsfall selbstständig die Längs- und Querführung des Fahrzeuges. Der Fahrer muss wie in Stufe 1 das Fahrzeug dauerhaft kontrollieren und jederzeit zu einer Übernahme des Fahrzeuges bereit sein [2, 4].

- ▶ **Stufe 3** klassifiziert das **hochautomatisierte Fahren**. Das Fahrzeugsystem übernimmt für einen speziellen Anwendungsfall die Längs- und Querführung des Fahrzeuges. Eine dauerhafte Überwachung des Systems durch den Fahrer ist nicht mehr erforderlich. Das System erkennt selbstständig seine Systemgrenzen und fordert in kritischen Situationen den Fahrer mit einer ausreichend großen Zeitreserve zur Übernahme des Fahrzeuges auf [4].
- ▶ **Stufe 4** klassifiziert das **vollautomatisierte Fahren**. In dieser Stufe übernimmt das Fahrzeugsystem die Längs- sowie Querführung des Fahrzeuges für einen speziellen Anwendungsfall vollständig und muss nicht durch den Fahrer überwacht werden. Das automatisierte Fahrzeug ist in diesem speziellen Anwendungsfall in der Lage, alle auftretenden Situationen selbstständig zu bewältigen, ohne dass ein Eingreifen von Seiten des Fahrers nötig sein sollte [4]. Nach Vollendung des speziellen Anwendungsfalls wird der Fahrer mit ausreichender Zeitreserve wieder zur Übernahme des Fahrzeuges aufgerufen [2].
- ▶ **Stufe 5** beschreibt das fahrerlose, **autonome Fahren**. Das Fahrzeugsystem übernimmt vollständig jegliche Fahraufgaben und steuert das Fahrzeug bei allen Straßentypen und Umfeldbedingungen vom Start bis zum Ziel selbstständig [4]. Der Fahrer wird letztendlich zum Passagier und übernimmt keine Fahraufgaben mehr [2]. In dieser Stufe können Lenkrad, Gas- und Bremspedal entfallen.

### 2.2.2 Fahrzeugsensoren

Damit das automatisierte Fahren eines Fahrzeuges im öffentlichen Straßenverkehr möglich ist, benötigt das Fahrzeug spezielle Sensoren, um seine Umgebung wahrnehmen zu können (siehe Abbildung 1). Die Hauptaufgabe aller Sensoren ist stets die Erkennung von Hindernissen in der Umgebung des Fahrzeuges. Dabei handelt es sich um eine Fremddortung der Hindernisse, das heißt die Hindernisse senden keine eigenen Signale an das Fahrzeug aus [21]. Im Folgenden werden die einzelnen Sensorklassen vorgestellt.



**Abbildung 1:** Fahrzeugsensoren eines automatisierten Fahrzeuges zur Erkennung von Hindernissen in der Fahrzeugumgebung [22]

- **Radio Detection and Ranging (Radar)** Sensoren sind bereits heute schon in vielen Fahrzeugen für, unter anderem, den Abstandsregeltempomaten verbaut und stellen eines der wichtigsten Systeme für das teil- und höherautomatisierte Fahren dar [21].

Die Funktionsweise des Sensors beruht auf dem sogenannten Doppler-Effekt. Der Sensor sendet dabei elektromagnetische Wellen aus, deren von einem Hindernis reflektiertes Echo wieder vom Sensor empfangen wird. Mithilfe des genannten Doppler-Effekts können anhand der Laufzeit der Welle und dem Frequenzunterschied der ausgesendeten und empfangenen Welle die Messgrößen Abstand und Geschwindigkeit direkt ermittelt werden [21]. Dafür stehen dem Radar vier Frequenzbänder im Mikrowellenbereich zur Verfügung: 24,0 - 24,25 GHz, 76 - 77 GHz, 77 - 81 GHz und eine Ultra-Breitband-Technologie im Frequenzbereich von 21,65 - 26,65 GHz allein für den Nahbereich [23]. Darüber hinaus unterteilt man das Radar in Long-Range Radar, Mid-Range Radar und Short-Range Radar [21, 23].

Das **Long-Range Radar** sendet typischerweise elektromagnetische Wellen mit einer Frequenz von 77 GHz aus und kann Objekte in bis zu 250 Metern Entfernung wahrnehmen [21, 24]. Da das Long-Range Radar Wellen mit einer höheren Frequenz (als das Short-Range Radar) ausstrahlt, resultiert aus dem physikalischen Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge, dass diese Wellen eine geringere Wellenlänge besitzen.

Dadurch ist das Long-Range Radar weniger störanfällig und wird deshalb unter anderem bei Abstandsregeltempomaten verwendet [4].

Das **Short-Range Radar** bedient sich der Ultra-Breitband-Technologie für den Nahbereich und sendet typischerweise Wellen mit einer Frequenz von 24 GHz aus, weshalb es zur Detektion von Hindernissen im Nahbereich eingesetzt wird [21]. Aufgrund der geringeren Frequenz und der daraus resultierenden größeren Wellenlänge weisen Short-Range Radarsensoren eine höhere Störanfälligkeit auf [4].

**Mid-Range Radarsensoren** sind zwischen Long-Range und Short-Range Radarsensoren angesiedelt und senden Wellen im 24 GHz- oder 77 GHz-Bereich aus [23, 25].

Ein großer Vorteil des Radars ist seine geringe Anfälligkeit für externe, witterungsbedingte Faktoren wie beispielsweise Nebel oder Regen. Dieser Vorteil ist in der Aussendung von elektromagnetischen Wellen begründet, wodurch das Radar optischen Messverfahren in dieser Hinsicht überlegen ist [21].

- ▶ **Light Detection and Ranging (Lidar)** Sensoren funktionieren nach demselben Prinzip wie Radarsensoren, senden allerdings keine Mikrowellen, sondern Wellen aus dem ultravioletten Bereich, Infrarot-Bereich oder sichtbares Licht aus. Demnach ist das Lidar ein optisches Messverfahren [23].

Bei diesem Verfahren wird, im Gegensatz zum Radar, das Mikrowellen ausstrahlt, ein Laserstrahl mit einer Wellenlänge von typischerweise 905 nm vom Sensor ausgesendet.

Mit „Lidar“ wird dabei der Sensor bezeichnet, bei dem keine beweglichen Teile (im Gegensatz zum Laserscanner) verwendet werden, sondern ausschließlich ein sogenanntes Dioden-Array – eine Aneinanderreihung von mehreren Dioden [21]. Bei freier Sicht erkennt ein Lidarsensor Objekte, welche nur wenige Infrarotstrahlen reflektieren, in einer Entfernung von bis zu 50 Metern. Reflektieren Objekte deutlich mehr Strahlen, kann der Sensor auch noch Objekte in 150 Metern Entfernung erkennen [26]. Dennoch ist das Lidar dem Radar damit in der Kategorie Reichweite unterlegen. Ein weiterer Nachteil des Lidar gegenüber dem Radar ist seine geringere Witterungsresistenz, vor allem bei Nebel [21].

Zum Einsatz kommt das Lidar daher vor allem bei City-Break Assistenten und Stop-and-go-Funktionen. Des Weiteren wird derzeit an der Entwicklung von 360°-Lidarsensoren gearbeitet, die ohne bewegliche Teile eine sehr genau Abbildung der Fahrzeugumgebung liefern können [21].

- ▶ **Laserscanner** sind vom Prinzip her Lidarsensoren. Dabei wird ein Sensor als Laserscanner bezeichnet, wenn dieser mit einer Diode und einem rotierenden Spiegel ausgestattet

ist. Dadurch liefert der Laserscanner eine Abbildung der Fahrzeugumgebung in Entfernung und Winkel [21]. Durch die Ausstrahlung von Laserstrahlen stellt die Verwendung von Laserscannern ebenfalls ein optisches Messverfahren dar.

Der bekannteste Vertreter des Laserscanners ist der Velodyne HDL-64E, der unter anderem beim Google Self Driving Car auf dem Fahrzeugdach verbaut ist [21].

- ▶ **Videosensoren / Kameras** haben gegenüber Radar- und Lidarsensoren einen entscheidenden Vorteil: sie können Farben wahrnehmen. Dadurch ist es ihnen möglich, Straßenschilder, Fahrbahnmarkierungen und vor allem Ampelphasen zu erkennen. Sie haben damit allgemein einen deutlichen Vorteil in der Objektklassifizierung [26]. Dazu wird in dem aufgenommenen Videobild nach Kanten gesucht, welche auf Fahrzeugumrisse, Fahrbahnmarkierungen, Fußgänger oder ähnliches hindeuten könnten, woraus anschließend durch geeignete Filter und Plausibilitätsalgorithmen genaue Umfeldinformationen gewonnen werden können [21]. Man unterscheidet zwischen Mono- und Stereokameras.

**Monokameras** können im Gegensatz zu Stereokameras nur zwei Dimensionen wahrnehmen, wonach folglich eine Information aus der realen Welt verloren geht: die Tiefeninformation. Demnach ist die Monokamera für Abstandsmessungen generell nicht geeignet. Dennoch können durch hochintelligente Algorithmen heutzutage Monokameras für Notbremsassistenten eingesetzt werden [21].

**Stereokameras** bestehen aus zwei Kameras mit einem zueinander fest definierten Abstand, woraus sich die der Monokamera fehlende dritte Dimension berechnen lässt [21].

Videosensoren haben allerdings auch Nachteile. Sie sind neben Nebel und Regen auch stark durch Licht, Schatten und Spiegelungen beeinflussbar. So können Kameras durchaus auch Objekte erkennen, welche in Wirklichkeit gar nicht existieren [26].

- ▶ **Infrarotsensoren** senden Licht aus dem Infrarot-Bereich aus und zählen zu den optischen Messverfahren [21]. Eine besondere Bedeutung bei Infrarotsensoren kommt der Wärmestrahlung zu. Sie bezeichnet die eigens von Menschen, Fahrzeugen oder Tieren an die Umgebung abgegebene Wärme (sofern die Umgebung kälter ist) in Form von Strahlung im infraroten Bereich [26]. Diese Wärmestrahlung kann von Infrarotsensoren aufgenommen werden, weshalb Infrarotsensoren vor allem bei Nachtsichtassistenten zum Einsatz kommen.
- ▶ **Ultraschallsensoren** senden als einzige Sensorklasse keine elektromagnetischen Wellen aus, sondern Schallwellen. Somit breiten sich diese Wellen nicht wie bei allen anderen Fahrzeugsensoren mit Lichtgeschwindigkeit aus, sondern mit Schallgeschwindigkeit, die etwa eine Million Mal langsamer ist [26]. Daher haben Ultraschallsensoren eine relativ



eingeschränkte Reichweite von etwa 10 Metern, weshalb sie ausschließlich für die Rundumsicht von Fahrzeugen im Nahbereich eingesetzt werden. Sie werden hauptsächlich als Einparksensoren und Totwinkel-Sensoren eingesetzt [21].

Es ist klar ersichtlich, dass jede Sensorklasse ihre Vor- und Nachteile hat. Eine grobe Übersicht dazu ist in Tabelle 1 dargestellt. Demnach liegt es nahe, Sensoren verschiedener Sensorklassen gleichzeitig einzusetzen, um die Nachteile eines Sensors durch die Vorteile eines anderen Sensors zu kompensieren. Dieser Gedanke wird bereits heute schon in modernen Fahrerassistenzsystemen umgesetzt (siehe Abbildung 1).

Kategorie	Radar	Lidar	Laser	Kamera	Infrarot	Ultraschall
<b>Objekterkennung</b>	gut	gut	gut	mittel	gut	gut
<b>Objektklassifizierung</b>	schlecht	mittel	mittel	gut	mittel	schlecht
<b>Reichweite</b>	gut	mittel	mittel	gut	mittel	schlecht
<b>Witterungsresistenz</b>	gut	mittel	mittel	schlecht	mittel	gut

**Tabelle 1:** Vergleich der verschiedenen Umfeldsensoren in Bezug auf Objekterkennung und -klassifizierung sowie Reichweite und Anfälligkeit gegenüber Nebel und Regen (Witterungsresistenz) mit dem Bewertungshorizont gut / mittel / schlecht. In Anlehnung an [27, p. 2]

Es ist von entscheidender Bedeutung, dass die Sensorkonfiguration eines Fahrzeuges, mit der die Gesamtheit aller verbauten Sensoren am Fahrzeug gemeint ist, eine geringe witterungsabhängige Dämpfung aufweist. Dabei bezeichnet die Dämpfung eines Signals, wie viel schwächer das Signal pro Kilometer Entfernung wird [21]. Die Verwendung von ausschließlich optischen Messverfahren ist aufgrund ihrer Anfälligkeit gegenüber Witterungen nicht sinnvoll. Die zusätzliche Verwendung von Radarsensoren könnte dem Abhilfe schaffen.

Auch die Erkennung kleinerer Objekte ist ein gutes Beispiel für die sinnvolle Kombination mehrerer Sensorklassen. Da Fußgänger und Radfahrer nur sehr kleine Reflexionsflächen bieten, können diese Verkehrsteilnehmer von Radarsensoren durchaus „übersehen“ werden. Lidarsensoren und Laserscanner sind in dieser Hinsicht deutlich präziser und können aufgrund ihrer sehr hohen Umfeld-Auflösung auch Objekte mit kleinen Reflexionsflächen wahrnehmen [21, 26].

Zu beachten ist schlussendlich noch, dass alle Sensoren prinzipiell Messfehler aufweisen; das heißt, dass der wahre Wert in einer Messung von einem sogenannten Rauschen umgeben ist.

Durch die Fusion mehrerer Sensoren unterschiedlicher Stärken und Schwächen kann dieses Rauschen bzw. die Varianz der Messung deutlich reduziert werden [21]. Die Sensorik muss also auf Messfehler einzelner Sensoren vorbereitet sein und jederzeit erkennen können, ob ein Sensor gestört wurde oder ausgefallen ist [26].

### 2.2.3 Maschinelle Wahrnehmung und Sensordatenfusion

Die grundsätzliche Aufgabe eines automatisierten, selbstfahrenden Fahrzeuges besteht darin, sein Umfeld wahrzunehmen, dies zu interpretieren und entsprechend zu agieren [5]. Die Wahrnehmung des Umfeldes erfolgt über die am Fahrzeug verbauten Sensoren, die in Kapitel 2.2.2 vorgestellt wurden. An dieser Stelle sei schon einmal erwähnt, dass es neben den am Fahrzeug verbauten Sensoren auch noch weitere Informationsquellen, wie Echtzeit-Daten von anderen automatisierten Fahrzeugen, Ampelanlagen oder digitalen Karten gibt, auf die später in Kapitel 2.3.2 noch genauer eingegangen wird.

Mit der maschinellen Wahrnehmung gehen drei Arten der Unsicherheit einher: die Zustandsunsicherheit, die Existenzunsicherheit und die Klassenunsicherheit [5]. Diese gilt es durch eine geschickte Konfiguration aus verschiedensten Sensoren zu minimieren.

- ▶ Die **Zustandsunsicherheit** beschreibt eine Unsicherheit in einer physikalischen Messgröße eines erkannten Objektes. Es besteht also eine Unsicherheit darin, ob beispielsweise der gemessene Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug tatsächlich dem realen Abstand entspricht. Sie ist ein Resultat der mit der Messung einhergehenden Varianz und generell nicht vermeidbar [5].
- ▶ Die **Existenzunsicherheit** bezeichnet die Unsicherheit über die tatsächliche Existenz eines durch die Sensoren erkannten Objektes [5].
- ▶ Die **Klassenunsicherheit** charakterisiert die Unsicherheit über die korrekte Objektklassifizierung eines erkannten Objektes [5].

Die Vereinigung aller durch Fahrzeugsensoren gewonnenen Daten bezeichnet man als Sensordatenfusion. Hierbei entsteht ein einheitliches Bild, in dem sich die Nachteile jedes Sensors durch die Vorteile anderer Sensoren kompensieren [26]. So können durch die Redundanz von Fahrzeugsensoren mehr Informationen über ein Objekt in die Bewertung miteingebracht werden, was die Varianz der Messwerte reduzieren kann. Des Weiteren können sich durch die Komplementarität von Sensoren Informationen in der Sensordatenfusion gegenseitig konstruktiv ergänzen und die Objekterkennung verbessern. Es darf allerdings nicht außer Acht gelassen werden, dass

durch die Einbringung von Fehlinterpretationen in der Sensordatenfusion die Fehlertoleranz erhöht werden kann [23].

Letztendlich muss ein autonomes, selbstfahrendes Fahrzeug (Stufe 5) selbstständig mit bisher nicht bekannten Situationen umgehen können und mit den ihm vorhandenen Ressourcen sicher an einem vorgegebenen Ziel ankommen. Dies ist ausschließlich durch die Verwendung Künstlicher Intelligenz (kurz KI) möglich [28]. Es ist unmöglich, jede denkbare Situation in einer Fahrzeugdatenbank abzuspeichern, sodass bei Bedarf auf diese zugegriffen werden kann. In einem so komplexen Verkehrsgeschehen wie es heute vorzufinden ist, ist es für einen Menschen dank seiner Intuition und seinen Erfahrungen keine große Herausforderung, auf ungewohnte Situationen angemessen zu reagieren. Für ein automatisiertes Fahrzeug stellt eine unbekannte, nicht vorprogrammierte Situation allerdings ein großes Hindernis dar, das es nur durch selbstständiges Lernen aus in der Vergangenheit gesammelter Daten bewältigen kann.

#### **2.2.4 Mensch-Maschine-Interaktion**

Solange das automatisierte Fahrzeug noch nicht selbstständig und autonom fährt, muss bis einschließlich beim hochautomatisierten Fahren der Mensch als Rückfallebene für das Fahrzeug zur Verfügung stehen (siehe Kapitel 2.2.1). Kommt das Fahrzeugsystem an seine Grenzen, muss der Mensch in der Lage sein, die Situation zu stabilisieren und die Kontrolle über das Fahrzeug zu übernehmen. Dabei spielen die Übernahmebereitschaft des Fahrers und eine hohe Systemtransparenz eine entscheidende Rolle – das Fahrzeug muss also mit dem Fahrer interagieren [3].

Neben der Interaktion des Fahrzeuges mit dem Fahrer ist aber auch eine Interaktion mit der Außenwelt erforderlich. Gerade bei der Automatisierungsstufe fünf, wo das Fahrzeug autonom und fahrerlos fährt, muss die Aufgabe der Kommunikation mit der Umwelt vollständig dem Fahrzeug übertragen werden. Einfache Handzeichen des Fahrers an einen Fußgänger, der die Straße überqueren möchte, sind dann nicht mehr möglich. Der Fahrer weiß schließlich nicht, was das Fahrzeug als nächstes tun wird oder folgt gerade nicht dem Fahrgeschehen [3]. Für automatisierte Fahrzeuge ist es allerdings sehr schwer zu erkennen, ob beispielsweise eine Person am Zebrastreifen, die ihren Kopf vom Fahrzeug wegdreht, die Straße nun überqueren möchte oder nicht. Der menschliche Fahrer besitzt in dieser Situation Erfahrungswerte und kann die Gestik anderer Verkehrsteilnehmer relativ schnell interpretieren. Das autonome Fahrzeug muss dieses Verhalten erst lernen.

Ein Nachteil von automatisierten Fahrzeugen im Rahmen der Mensch-Maschine-Interaktion, der noch genannt werden sollte, ist deren defensive Programmierung. Diese bezeichnet die Tatsache, dass automatisierte und im Speziellen autonome Fahrzeuge als oberstes Ziel haben, eine drohende Kollision zu vermeiden. Fährt ein Fahrzeug auf einen Menschen zu, so wird das Fahrzeug in jedem Fall anhalten oder ausweichen und dem Menschen somit Vorfahrt gewähren [8]. Das könnte beispielsweise von Fußgängern ausgenutzt werden, welche schnell eine Straße überqueren möchten und wissen, dass ihnen alle Fahrzeuge ausweichen werden. Bei derzeit allen in Pilot-Projekten autonom fahrenden Fahrzeugen ist dies der Fall.

Es bedarf somit einheitlicher und neu definierter Interaktionskonzepte zwischen Menschen und Maschinen.

### 2.2.5 Autonomer Bus

Autonome Shuttle-Busse sind zurzeit immer öfter in den Medien. Zu den derzeit bekanntesten Herstellern autonomer Shuttle-Busse zählen die französischen Hersteller EasyMile und Navya sowie der US-amerikanische Hersteller Local Motors. Im Folgenden wird exemplarisch der autonome Bus des Herstellers Navya vorgestellt, der in Abbildung 2 zu sehen ist.



**Abbildung 2:** Shuttle-Bus des Herstellers Navya inklusive Sichtfelder der Fahrzeugsensoren [29]

Der 4,75 Meter lange Kleinbus bietet Platz für bis zu 15 Passagiere. Er verfügt über einen Elektromotor mit 15 kW Leistung, hat eine Höchstgeschwindigkeit von 25 km/h und kann mit einer

Batterieladung an die neun Stunden fahren. Der Fahrgastraum ist unter anderem mit zwei Not-halt-Knöpfen und einem 15 Zoll großen Touchscreen-Monitor ausgestattet, über den die Fahrgäste mit dem Fahrzeug und umgekehrt kommunizieren können [30].

Zur Umfeldwahrnehmung und Navigation befinden sich am Fahrzeug zwei verschiedene Lidarsensoren, mehrere Kameras und ein globales Navigationssystem (kurz GNSS).

- ▶ Jeweils eine **Monokamera** ist mittig am oberen Ende der Front- und Heckscheibe angebracht. Sie beobachten das Geschehen vor und hinter dem Fahrzeug und achten insbesondere auf Verkehrsschilder und Ampeln. Sie tragen wesentlich zur Objektklassifikation von Objekten vor und hinter dem Fahrzeug bei. In Abbildung 2 entsprechen sie den sich von der Front- und Heckscheibe ausbreitenden roten Farbkegeln [29].
- ▶ Zwei **360 Grad Lidarsensoren** befinden sich, jeweils einer vorne und hinten, kurz oberhalb der Kameras. Sie ermöglichen eine dreidimensionale Objekterkennung im gesamten Fahrzeugumfeld und tragen zur Positionsbestimmung des Fahrzeuges auf einer berechneten dreidimensionalen Karte bei. Ihre Sichtfelder entsprechen den orangenen, kreisförmigen Körpern in Abbildung 2.
- ▶ Sechs **180 Grad Lidarsensoren** sind bodennah um das Fahrzeug verteilt angebracht. Sie dienen ebenfalls der dreidimensionalen Objekterkennung im Fahrzeugumfeld und der Positionsbestimmung des Fahrzeuges selbst. Sie sind in Abbildung 2 durch blaue Halbkreise dargestellt [29, 30].
- ▶ Die **GNSS Antenne** befindet sich auf dem Fahrzeugdach und ermöglicht dem GNSS eine zentimetergenaue Positionsbestimmung des Fahrzeuges [29].
- ▶ Ein weiteres System, mit dem das Shuttle ausgestattet ist, ermöglicht dem Fahrzeug eine bidirektionale Kommunikation mit der städtischen Infrastruktur, wie beispielsweise Ampelanlagen [29]. Auf diese Kommunikationsmöglichkeit wird in Kapitel 2.3.2.2 genauer eingegangen. Sie wird in Abbildung 2 durch gestrichelte Linien zwischen Ampel und Fahrzeug dargestellt.

## 2.3 Infrastruktur

Für den hoch- und vollautomatisierten sowie insbesondere den autonomen Verkehr werden weitere Infrastrukturen benötigt [8]. Darüber hinaus können Infrastrukturmaßnahmen grundsätzlich die Entwicklung der Automatisierungstechnologien beschleunigen [3].

Ein Aspekt, der bis jetzt noch außer Acht gelassen wurde, ist die Antriebstechnologie automatisierter Fahrzeuge, welche grundsätzlich unabhängig vom Kontext des autonomen Fahrens ist.

Dennoch sei an dieser Stelle erwähnt, dass im Zusammenhang mit der Antriebstechnologie der Aus- oder Aufbau einer Ladeinfrastruktur erforderlich ist [31].

Im Folgenden wird zwischen der verkehrstechnischen Infrastruktur, die sich auf das Verkehrsnetz im Allgemeinen bezieht, und der informationstechnischen Infrastruktur, die sich auf den Austausch von Daten im Straßenverkehr bezieht, unterschieden.

### **2.3.1 Verkehrstechnische Infrastruktur**

Für das selbstfahrende Fahrzeug sind gut erkennbare Fahrbahnmarkierungen und Leitpfosten am Fahrbahnrand entscheidend für seine Querpositionierung und maschinelle Wahrnehmung auf der Straße [15]. Derzeit bestehende Standards sehen gut reflektierende Fahrbahnmarkierungen, gut positionierte Verkehrszeichen, ebene Fahrbahnoberflächen, durchgängig verfügbare Seitenstreifen und kontrastreiche Fahrbahnmarkierungen vor [31].

Für das hochautomatisierte Fahren bei niedrigen Geschwindigkeiten, wie im Stop-and-go-Verkehr oder in Staus, sind die derzeitigen Standards ausreichend. Durch diese Standards und eine regelmäßige Wartung dieser wird dem Fahrzeug in erster Linie eine verlässliche Lesbarkeit der Straßeninfrastruktur durch die Fahrzeugsensoren ermöglicht. Für das hochautomatisierte Fahren bei höheren Geschwindigkeiten, wie beispielsweise auf der Autobahn, werden die genannten Standards von immer größerer Bedeutung. Zusätzlich zu verkehrstechnischen Aspekten sind auch informationstechnische Aspekte relevant. Für eine genauere Umfelderkennung und Positionsbestimmung des Fahrzeuges reichen die fahrzeugeigenen Daten nicht mehr aus und müssen durch Informationen der informationstechnischen Infrastruktur ergänzt werden [31].

Auch in den beiden höchsten Ausbaustufen, bei vollautomatisiertem und autonomem Fahren, ist eine entsprechende informationstechnische Infrastruktur zwingend erforderlich. Die verkehrstechnische Infrastruktur mit Ampelanlagen und Verkehrsleitsystemen muss mit der informationstechnischen Infrastruktur eng verknüpft werden, sodass beispielsweise Ampelanlagen und automatisierte Fahrzeuge kommunizieren können. Eine international einheitliche Gestaltung verkehrstechnischer Einrichtungen ist ebenfalls von großer Bedeutung [31].

### **2.3.2 Informationstechnische Infrastruktur**

Erst durch den Aufbau einer entsprechenden informationstechnischen Infrastruktur wird das vernetzte Fahren automatisierter Fahrzeuge möglich. Dabei geht es um den Informationsaustausch

auf unterschiedlichen Kommunikationswegen zwischen den Fahrzeugen selbst sowie zwischen Fahrzeug und Infrastruktur.

### **2.3.2.1 Vernetztes Fahren**

Erst mit der Vernetzung von Fahrzeugen und der Infrastruktur entfaltet das automatisierte Fahren sein ganzes Potenzial. Automatisierte Fahrzeuge könnten grundsätzlich zwar auch „offline“ und ohne Kommunikation mit anderen Fahrzeugen fahren, allerdings nur unter optimalen Bedingungen [15]. Sollten beispielsweise Sichtbeeinträchtigungen, Sensorprobleme, geänderte Straßenführungen oder unkenntliche Fahrbahnmarkierungen auftreten, hätte das automatisierte Fahrzeug ein großes Problem und müsste entweder sehr langsam fahren oder anhalten. Insgesamt würde dadurch zwar immer noch die Verkehrssicherheit verbessert werden, aber die Verkehrseffizienz hätte darunter stark zu leiden.

Durch vernetztes Fahren könnten sich Fahrzeuge gegenseitig vor Gefahrenstellen warnen [2]. Entsteht auf der Autobahn ein Stau, könnten die am Stauende stehenden Fahrzeuge automatisch diese Information an alle folgenden Fahrzeuge weitergeben, sodass diese rechtzeitig über das kommende Stauende informiert werden würden und ihr Tempo verlangsamen könnten. Genauso könnte das Fahrzeug seine Geschwindigkeit automatisch an die gegebene Verkehrsdichte anpassen und so insgesamt die Verkehrssicherheit deutlich verbessern [2].

Durch intelligentes Verkehrsmanagement könnten Ampelanlagen in Städten mit den Fahrzeugen kommunizieren und einen hoch effizienten Verkehrsfluss ermöglichen. Parkplätze, Tunnel-Überwachungskameras und sonstige Verkehrsüberwachungssysteme könnten Echtzeitinformationen an alle Fahrzeuge liefern, auf Basis derer das Fahrzeug eine optimale Route berechnen kann. Auch könnten, durch die Vernetzung von Fahrzeugen untereinander, auf der Autobahn durch verringerte Sicherheitsabstände mehr Fahrzeuge fahren, was alles in allem zu einer deutlichen Steigerung der Verkehrseffizienz führt [2].

Intelligent vernetzte Fahrzeuge könnten darüber hinaus bei technischen Problemen, wie dem Ausfall eines Fahrzeugsensors, automatisch Kontakt mit einer zuständigen Werkstatt aufnehmen. Das Fahrzeug könnte den aktuellen Zustand des Sensors übermitteln, den hochgerechneten Ausfallzeitpunkt berechnen und daraufhin einen Termin mit der Werkstatt vereinbaren sowie das nötige Ersatzteil reservieren [4].

Die Vernetzung automatisierter Fahrzeuge und der sie umschließenden Infrastruktur bietet allerehand Vorteile, die auf der Kommunikation der Fahrzeuge untereinander und der Fahrzeuge mit der Infrastruktur beruhen.

### 2.3.2.2 Kommunikation und Datenaustausch

Der Überbegriff, unter dem alle Kommunikationen des vernetzten Fahrens stehen, ist die Fahrzeug-zu-X-Kommunikation (kurz V2X-Kommunikation, aus dem Englischen (kurz a.d.E.) vehicle-to-x-communication) oder auch Car-to-X-Kommunikation (C2X-Kommunikation). Hierbei steht „X“ für die vernetzte Umwelt des Fahrzeuges [4, 8]. Insgesamt fasst dieser Überbegriff alle Kommunikationen des automatisierten und vernetzten Fahrzeuges mit seiner Umwelt zusammen.

Grundsätzlich wird zwischen zwei Kommunikationsarten der V2X-Kommunikation unterschieden: der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation (kurz V2V-Kommunikation, a.d.E. vehicle-to-vehicle-communication) und der Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation (kurz V2I-Kommunikation, a.d.E. vehicle-to-infrastructure-communication).

Die **V2V-Kommunikation** bezeichnet den Austausch von Informationen zwischen Fahrzeugen. Dabei geht es vor allem um die gegenseitige Warnung vor kritischen Verkehrssituationen wie beispielsweise Glatteis, Staus oder Verkehrshindernissen [2]. Durch die V2V-Kommunikation ist das Fahren in Kolonnen mit geringen Sicherheitsabständen möglich, da so alle Fahrzeuge zeitgleich abgebremst und beschleunigt werden können. Der Datenaustausch zwischen den vernetzten Fahrzeugen kann dabei entweder direkt (V2V-Kommunikation) oder indirekt über die entsprechende Infrastruktur (V2I-Kommunikation und anschließend V2V-Kommunikation) erfolgen [15].

Die **V2I-Kommunikation** beschreibt den Austausch von Informationen zwischen den Fahrzeugen und der Infrastruktur. Der Informationsaustausch beinhaltet Daten von Höchstgeschwindigkeiten aktueller Baustellen bis hin zu aktuellen Verkehrsflussdaten von Verkehrsleitzentralen, aufgrund dessen die Fahrzeuge ihre Geschwindigkeit für einen effizienteren Verkehrsfluss anpassen können [2]. Auch die in Kapitel 2.2.5 erwähnte bidirektionale Kommunikation des Fahrzeuges mit der städtischen Infrastruktur, wie der Kommunikation zwischen Ampeln und Fahrzeugen, entspricht der V2I-Kommunikation.

Zum Echtzeit-Datenaustausch per V2X-Kommunikation stehen unterschiedliche Übertragungstechnologien zur Verfügung.

- ▶ Auf kürzeren Distanzen von einigen hundert Metern eignen sich vor allem Netze auf Basis des ITS G5 5,9 GHz Standards, der einer speziellen **WLAN** Übertragung entspricht [31]. Das Europäische Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) hat dafür auf dem Mikrowellenbereich von 5,895 GHz bis 5,905 GHz ein spezielles WLAN-Protokoll (802.11p) definiert [4]. Diese Übertragungstechnologie erweist sich für kurze V2V-Kommunikationen, wie beispielsweise für den Informationsaustausch im Kolonnenverkehr, als nützlich.



- ▶ Für weitere Distanzen eignet sich vor allem das Mobilfunknetz mit dem **Mobilfunkstandard 5G**. Die Mobilfunkstandards LTE und 4G reichen für eine lückenlose Datenübertragung in Echtzeit aufgrund zu niedriger Übertragungsraten und hoher Latenzzeiten nicht aus [15, 31]. Diese Übertragungstechnologie erweist sich für V2I-Kommunikationen, wie beispielsweise der Warnung vor temporären Baustellen auf der Autobahn, als nützlich. Aber auch V2V-Kommunikationen über längere Distanzen, wie die Warnung vor einem kommenden Stauende, sind durch diese Technologie möglich.
- ▶ Eine weitere Übertragungstechnologie, die bereits heute schon verwendet wird, ist die **Satellitennavigation** über das Global Positioning System (GPS) und das europäische System Galileo [2]. Sie dient der genauen Positionsbestimmung des automatisierten und vernetzten Fahrzeuges.

Zentrale Kriterien für die informationstechnische Infrastruktur sind im Hinblick auf die Übertragungstechnologien eine hohe Netzabdeckung, eine große Bandbreite und geringe Latenzzeit [15]. Im Zusammenhang mit dem Echtzeit-Datenaustausch zwischen vernetzten Fahrzeugen wird auch von der „Schwarm-Intelligenz“ gesprochen [8].

### 2.3.2.3 Daten und Datenschutz

Woher kommen all die Daten, welche beispielsweise vor einem auf der Strecke liegenden Verkehrsunfall warnen?

Zum einen handelt es sich um fahrzeugeigene Daten verschiedener Fahrzeuge, die durch die Fahrzeugsensoren generiert wurden [15]. Dabei werden bei vernetzten Fahrzeugen folgende vier Datenarten unterschieden:

- ▶ **Navigationsdaten** wie Standort, Reiseziel und Reisezeiten,
- ▶ Daten zur **Fahrdynamik** wie beispielsweise über Beschleunigungen und Bremsungen,
- ▶ Daten zum **Fahrverhalten**, die aus verschiedenen Lokalisierungsdaten abgeleitet werden können (beispielsweise die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit) und
- ▶ Daten aus der **Fahrzeugumgebung** wie Mitschnitte einer Fahrzeugkamera [5].

Zum anderen stellen verschiedene Einrichtungen der informationstechnischen Infrastruktur Daten zur Verfügung. Dazu zählen unter anderem Ampelanlagen und andere Kameras und Sensoren der Infrastruktur, die beispielsweise das Verkehrsaufkommen beobachten [7].

Es wird schnell ersichtlich, dass bei all den Datenaustauschen eine so hohe Anzahl an Daten anfällt, sodass auch fehlerhafte Daten nicht ausbleiben können. Für die Überprüfung der Daten sind daher vor allem die Kriterien Integrität, Echtzeit und Genauigkeit wichtig. Jedes Fahrzeug

muss im Stande sein, alle Daten zu analysieren und auch mit nicht auflösbaren Widersprüchen zwischen unterschiedlichsten Daten umgehen zu können [31].

Ein Großteil aller Daten hat einen konkreten Personenbezug und bringt damit unweigerlich das Thema Datenschutz mit ein. Allein die fahrzeugeigenen Daten enthalten teilweise höchst sensible und personenbezogene Daten, wie Aufenthaltsort, -dauer, Gewohnheiten und viele mehr. Miteinander geht die Frage, wem diese Daten gehören und wie damit umzugehen ist [8]. Deutschland hat dazu auf UNECE-Ebene bereits grundlegende Vorgaben in den Punkten Datenschutz und Cybersicherheit erarbeitet, die im März 2017 verabschiedet wurden. Weiterhin wurde auf EU-Ebene eine sogenannte *Public Private Data Taskforce* eingesetzt, die sich mit genau solchen Fragen im Kontext des automatisierten und vernetzten Fahrens auseinandersetzt [15].

#### 2.3.2.4 Digitale Referenzkarte

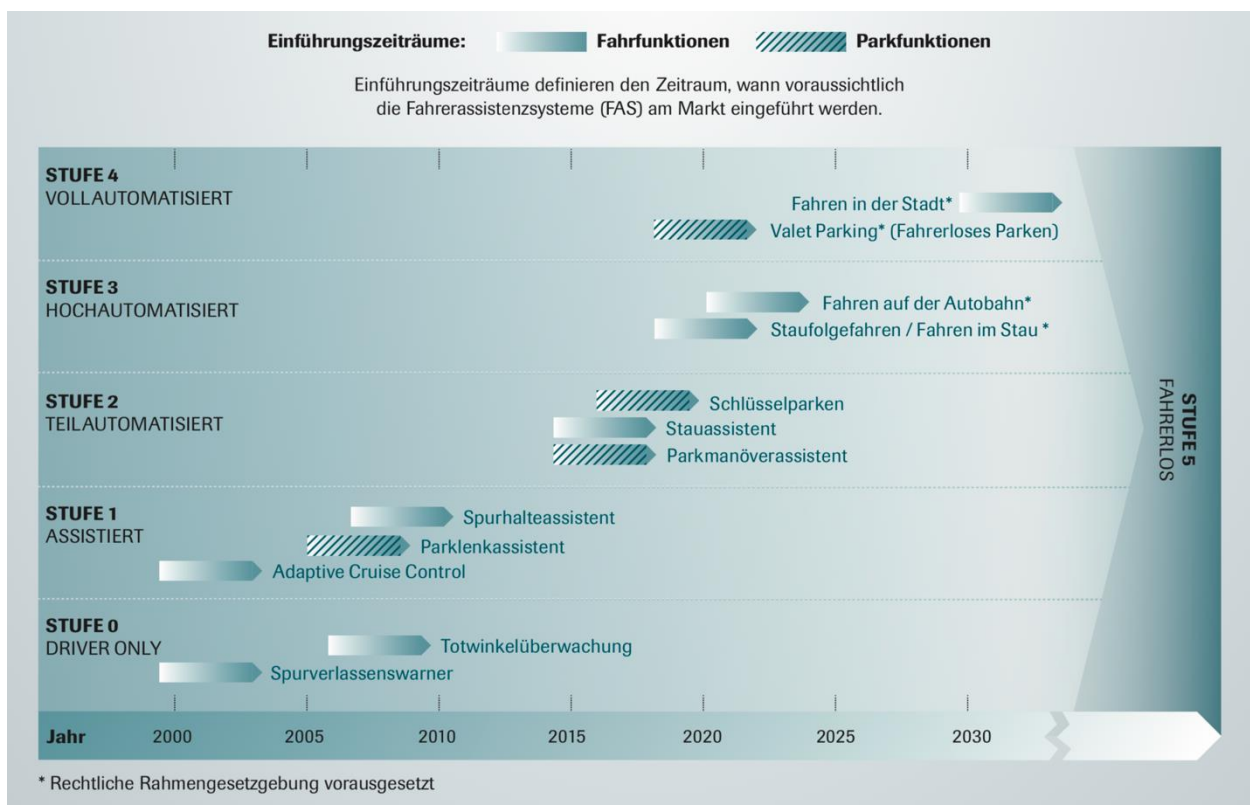
Eine weitere, für das automatisierte Fahren unverzichtbare Technologie, ist die sogenannte digitale Referenzkarte. Sie muss die vorhandene verkehrstechnische und informationstechnische Infrastruktur flächendeckend und hochgenau abbilden und jederzeit aktuell sein [31]. Sie beinhaltet statische Straßendaten, dynamische Straßenstatusdaten und dynamische Verkehrsdaten [15]. Zu den **statischen Straßendaten** gehören unter anderem Informationen über die Straßengeometrie, Anzahl der Fahrspuren, Verkehrsschilder und Verkehrspläne. **Dynamische Straßenstatusdaten** beinhalten unter anderem Informationen über Straßensperrungen, Baustellen, Unfälle, dynamische Geschwindigkeitsbeschränkungen und den Straßenzustand [32]. **Dynamische Verkehrsdaten** geben Auskunft über den aktuellen Verkehrsfluss und Staus.

Um beispielsweise im urbanen Raum ein sicheres automatisiertes Fahren zu ermöglichen, benötigt ein Fahrzeug sehr genaue Kartendaten über Koordinaten von Bordsteinen, Koordinaten von Fahrbahnmarkierungen, Anzahl und Breite der Fahrspuren, Koordinaten von Laternenmasten, Ampeln, Verkehrsschildern und Fußgängerübergängen [21].

### 3 Aktueller Stand des automatisierten Fahrens

Dieses Kapitel beleuchtet den aktuellen Stand der Automatisierung und Vernetzung von Fahrzeugen im Realbetrieb.

Der aktuelle Stand der Automatisierung entspricht der Teilautomatisierung. Eine Einführung der in der nächsten Ausbaustufe zu erwartenden Hochautomatisierung wird nach dem Verband der Automobilindustrie voraussichtlich ab dem Jahr 2020 mit dem Anwendungsschwerpunkt auf Autobahnen möglich sein. Ein vollautomatisierter Fahrbetrieb, unter anderem auch in Städten, wird voraussichtlich ab dem Jahr 2030 möglich sein. Mit dem autonomen Fahren in der nahen Zukunft ist nach aktuellem Stand noch nicht zu rechnen [33]. Abbildung 3 veranschaulicht die voraussichtlichen Einführungszeiträume.



**Abbildung 3:** Voraussichtliche Einführungszeiträume automatisierter Fahr- und Parkfunktionen nach dem Verband der Automobilindustrie [33, p. 15]

### 3.1 Stand der Technik

In den Medien wird des Öfteren über Unfälle von Fahrzeugen im automatisierten Fahrbetrieb des US-amerikanischen Unternehmens Tesla berichtet und gezeigt, dass aus technischer Sicht bislang noch ungelöste Probleme bestehen. Situationen, die das automatisierte Fahrzeug aktuell noch vor Probleme stellen können, sind beispielsweise Aufkleber auf Fahrzeugen, die als Verkehrsschilder interpretiert werden, Schatten oder Spiegelungen des Sonnenlichts, die als Objekte erkannt werden, oder Objekte wie ein weißer Lkw-Anhänger, die als Horizont interpretiert werden [34]. Auch stoßen beispielsweise spezielle Technologien wie Fahrzeugprozessoren oder Algorithmen derzeit noch auf ungelöste Probleme. Automatisierte Fahrzeuge können beispielsweise noch nicht reibungslos mit unerwarteten Vorkommnissen im Straßenverkehr, wie dem Haltezeichen eines Polizisten, umgehen [20]. Dabei liegt das Problem im Wesentlichen nicht in der Objekterkennung, sondern vor allem in der Interpretation und Objektklassifikation [13].

Aus Sicht der Interpretation kommt es also derzeit noch in bestimmten Situationen zu Problemen, die vom automatisierten Fahrzeug fehlerhaft oder gar nicht gelöst werden. Dies würde dem hochautomatisierten Fahren grundsätzlich gerecht werden, sofern das Fahrzeug seine Systemgrenze zuverlässig erkennt und den Fahrer rechtzeitig informiert. Für das vollautomatisierte Fahren muss das Fahrzeug im spezifischen Anwendungsfall jedoch sämtliche auftretende Probleme selbst lösen können und kann die Fahraufgabe nicht mehr an den Fahrer übergeben, wogegen die bislang noch nötigen Eingriffe des Fahrers in den automatisierten Fahrbetrieb sprechen [35].

Wie auch Abbildung 3 entnommen werden kann, bezieht sich die Hochautomatisierung zunächst größtenteils auf bestimmte automatisierte Fahrzustände auf der Autobahn. Dies liegt unter anderem darin begründet, dass Autobahnen und Bundesstraßen größtenteils den aktuellen verkehrstechnischen Standards entsprechen [15]. Im urbanen Fahrbetrieb kommen automatisierte Fahrzeuge derzeit aufgrund der höheren Komplexität, wie beispielsweise durch das Zusammentreffen unterschiedlichster Verkehrsteilnehmer (Fahrzeuge, Fahrräder, Fußgänger etc.), und einer unzureichend vorhandenen Infrastruktur an ihre Grenzen.

Im Rahmen der informationstechnischen Infrastruktur haben sich die Mobilfunkbetreiber beim Breitbandausbau des Mobilfunknetzes im Zuge der *Digitalen Dividende II* 2015 dazu verpflichtet, alle Hauptverkehrswege vollständig abzudecken [15]. Dies ist der Grundstein für die Bereitstellung der erforderlichen informationstechnischen Infrastruktur. Aktuell besteht auf Autobahnen und Bundesstraßen allerdings noch eine unzureichende Mobilfunkabdeckung [15]. Die V2X-Kommunikation ist daher nach aktuellem Stand großflächig nicht möglich, ist aber für das hochautomatisierte Fahren auf Autobahnen generell nicht zwingend erforderlich [36]. Für das vollautomatisierte

oder gar autonome Fahrzeug ist diese Kommunikation allerdings unverzichtbar, womit ein voll-automatisierter oder autonomer Fahrbetrieb aktuell nicht möglich ist.

Zudem existieren noch offene Fragestellungen bei den Themen Recht und Haftung sowie Unklarheiten beim Thema Datenschutz, ohne deren Klärung ein höher-automatisiertes Fahren im Realbetrieb ohnehin nicht möglich ist.

Der Einführung der Hochautomatisierung als nächste Ausbaustufe der Automatisierung mit einem Anwendungsgebiet auf deutschen Autobahnen stehen insgesamt keine grundlegenden technischen Probleme im Weg [36].

### 3.2 Stand der Forschung

In Deutschland gibt es aktuell (Stand August 2018) 15 Testfelder, die das automatisierte und vernetzte Fahren im Realbetrieb erforschen [37]. Dazu zählt unter anderem das **Digitale Testfeld Autobahn** auf der Bundesautobahn 9 zwischen München und Nürnberg, das sich neben der Erprobung der automatisierten Fahrfunktionen schwerpunktmäßig mit der Erforschung vernetzter Fahrfunktionen (V2V- und V2I-Kommunikation) beschäftigt. Es besitzt eine lückenlose LTE-Mobilfunk- sowie WLAN-Abdeckung, eine hochgenaue digitale Referenzkarte mit aktuellen Verkehrs- und Baustelleninformationen sowie durchgängige und gut sichtbare Fahrbahnmarkierungen und Leitpfosten [37]. Damit ist das Digitale Testfeld Autobahn durch seine Forschungsergebnisse ein sehr wichtiger Wegbereiter des künftigen hochautomatisierten Fahrens.

Auch das **Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg** in den Städten Karlsruhe, Bruchsal und Heilbronn ist eines der 15 bundesweiten Testfelder. Es beschäftigt sich unter anderem mit der Erforschung des innerstädtischen Betriebes von automatisierten Bussen und neuen Mobilitätskonzepten im ÖPNV. Darüber hinaus legt das Testfeld weitere Schwerpunkte in der V2I-Kommunikation mit Lichtsignalanlagen, wie beispielsweise Ampeln, der Erfassung von Verkehrsdaten und Daten über den Straßenzustand oder das Wetter sowie der Erstellung hochgenauer, dreidimensionaler Referenzkarten. Ausgestattet ist das Testfeld mit einer flächendeckenden LTE-Mobilfunkabdeckung, einer Teilabdeckung durch die Mobilfunktechnologie 5G und WLAN-Technologien an Lichtsignalanlagen [37].

Das internationale Testfeld **Digitales Testfeld Deutschland-Frankreich-Luxemburg** befindet sich ebenfalls unter den Testfeldern und betreibt seit April 2019 eine Forschungsstrecke im Dreiländereck zwischen dem deutschen Merzig im Saarland, dem französischen Metz und dem lu-

xemburgischen Bettemburg. Auf allen Straßenkategorien werden hier unter anderem verschiedenste Fahrfunktionen automatisierter und vernetzter Fahrzeuge auf ihre grenzüberschreitende Kompatibilität erforscht. Darüber hinaus beschäftigt sich das Testfeld mit Themen der Datenverarbeitung und des Datenaustausches [37, 38].

Die Bundesregierung gibt in ihrer Strategie zum automatisierten und vernetzten Fahren folgende Forschungsthemen bekannt, die bereits für die Ausbaustufe der Hochautomatisierung noch zu bearbeiten sind:

- ▶ elektronische Komponenten,
- ▶ Fahrzeugsystemarchitektur,
- ▶ Funktionsumsetzung und -gestaltung,
- ▶ Kommunikation und Vernetzung,
- ▶ Lokalisierung und digitale Karte,
- ▶ Mensch-Fahrzeug-Interaktion,
- ▶ innovative Fahrzeugkonzepte,
- ▶ Infrastruktur und Verkehr,
- ▶ Validierung, Erprobung und Absicherung,
- ▶ gesellschaftliche Aspekte und
- ▶ rechtliche Aspekte [15].

Diesen Themen nehmen sich derzeit Testfeldbetreiber und Forschungsgruppen, aber auch Unternehmen und Universitäten, an.

### **3.3 Stand automatisierter Kleinbusse im ÖPNV**

Wie schon eingangs erwähnt, stehen automatisierte Kleinbusse vor den gleichen bereits genannten technischen Herausforderungen automatisierter Fahrzeuge. Je nach Anwendungszweck kann die miteinhergehende Komplexität allerdings unterschiedlich ausfallen. So sind reine Liniensebusse, die einer fest vorgegebenen Route folgen ohne davon abzuweichen, weniger komplex als Busse, die dem On-Demand-Konzept nachgehen und sich frei auf allen Straßen bewegen [39].

Ein großes Hindernis für die generelle Einführung selbstfahrender, fahrerloser Kleinbusse im ÖPNV ist die rechtliche Lage. Wie in Kapitel 2.1.5 erwähnt, ist das Zulassen und Betreiben von autonomen Fahrzeugen auf öffentlichen Straßen grundsätzlich nicht möglich, es besteht aller-

dings eine Ausnahmeregelung nach § 70 StVZO. Unter diese Ausnahmeregelung fallen aber bestimmte Einschränkungen, wie ein festgelegter Einsatzzeitraum, Streckenabschnitt und eine festgelegte Höchstgeschwindigkeit (siehe Kapitel 2.1.5).

In den zwei Städten Bad Birnbach in Bayern und Keitum auf Sylt fahren bereits autonome Busse auf öffentlichen Straßen im ÖPNV mit einer solchen Ausnahmegenehmigung. Das Shuttle in Bad Birnbach, das in Kapitel 2.1.3 bereits vorgestellt wurde, fährt auf einer Strecke von 1.400 Metern mit vier Haltestellen und maximal 15 km/h; das Shuttle in Keitum auf einer Strecke von 2.700 Metern mit sieben Haltestellen und maximal 18 km/h. Bei beiden ist ein sogenannter Operator mit an Bord, der aus rechtlichen Gründen mitfahren muss, um bei Bedarf manuell in das Fahrgeschehen einzugreifen. Dies erfolgt allerdings nur über Knöpfe und einen Joystick – Pedale oder Lenkrad sind nicht mehr verbaut. Bei extremen Wettersituationen, wie Gewittern mit Starkregen, dürfen die Fahrzeuge nicht betrieben werden [11, 40, 41].

Aus technischer Sicht folgen die autonomen Kleinbusse jeweils einer Route auf einer digitalen Referenzkarte, wofür im Vorhinein die zu befahrenen Straßen exakt vermessen wurden. Dieser Route folgen die Busse ohne Abweichungen. Sollte sich vor dem Fahrzeug ein Hindernis befinden, erfasst das Fahrzeug dieses über die eingebauten Fahrzeugsensoren und verlangsamt sein Tempo oder bleibt stehen. Ein automatisches Ausweichen ist derzeit nicht möglich [11]. Des Weiteren sind die Fahrzeugsysteme, bezogen auf die möglichen Szenarien im Fahrbetrieb, noch nicht robust genug für einen serienreifen Einsatz im Straßenverkehr [39].

Aufgrund der sehr defensiven Programmierung, der niedrigen Fahrgeschwindigkeit, der Witterungsabhängigkeit sowie der zu geringen System-Robustheit hält sich die Einsetzbarkeit autonomer Kleinbusse im ÖPNV derzeit noch in Grenzen. Der aktuelle Einsatz autonomer Kleinbusse zielt vor allem auf die Erforschung des autonomen Fahrens im Realbetrieb, die Optimierung der Umfeldwahrnehmung sowie den gesellschaftlichen Dialog mit den Kunden ab [11].

## 4 Fallstudien

In diesem Kapitel werden drei konkrete Fallstudien eingeführt, aus denen die Anforderungen an Fahrzeuge des automatisierten ÖPNV, anhand der in den vorherigen Kapiteln erarbeiteten Grundlagen, hergeleitet werden. Das Ziel ist es, durch die unterschiedlichen Anwendungsfälle in den Fallstudien eine möglichst breit gefächerte Anforderungserfassung zu ermöglichen. Dabei werden in den einzelnen Fallstudien auch grundsätzliche Anforderungen, bezogen auf autonome Fahrzeuge bzw. Busse im Allgemeinen, genannt. Einmal gestellte Anforderungen gelten daher implizit, sofern sie auf den konkreten Anwendungsfall zutreffen, auch für alle anderen Fallstudien.

In allen drei Fallstudien wird von einem Fahrzeug der Automatisierungsstufe fünf – einem autonomen Fahrzeug – ausgegangen. Grundsätzlich ist auch der Einsatz von hoch- oder vollautomatisierten Fahrzeugen im ÖPNV denkbar. Aus Sicht der Betreiber wären solche Fahrzeuge allerdings wirtschaftlich deutlich weniger effizient, da immer noch ein Fahrer am Steuer sitzen muss<sup>1</sup>. Aus diesem Grund wird bei Fahrzeugen im ÖPNV die Automatisierungsstufe fünf anvisiert.

In den folgenden drei Kapiteln 4.1, 4.2 und 4.3 wird jeweils eine Fallstudie vorgestellt. In den Unterkapiteln jeder Fallstudie werden die einzelnen Anforderungen an diese automatisierten Fahrzeuge im ÖPNV herausgearbeitet. Dabei wird zwischen fahrzeugtechnischen, infrastrukturellen und rechtlichen Anforderungen sowie Anforderungen aus Nutzersicht und Anforderungen seitens des ÖPNV unterschieden. Eine exakte Zuordnung einer Anforderung zu einer der fünf Kategorien ist nicht immer möglich, sodass gestellte Anforderungen auch auf mehrere Kategorien zutreffen können.

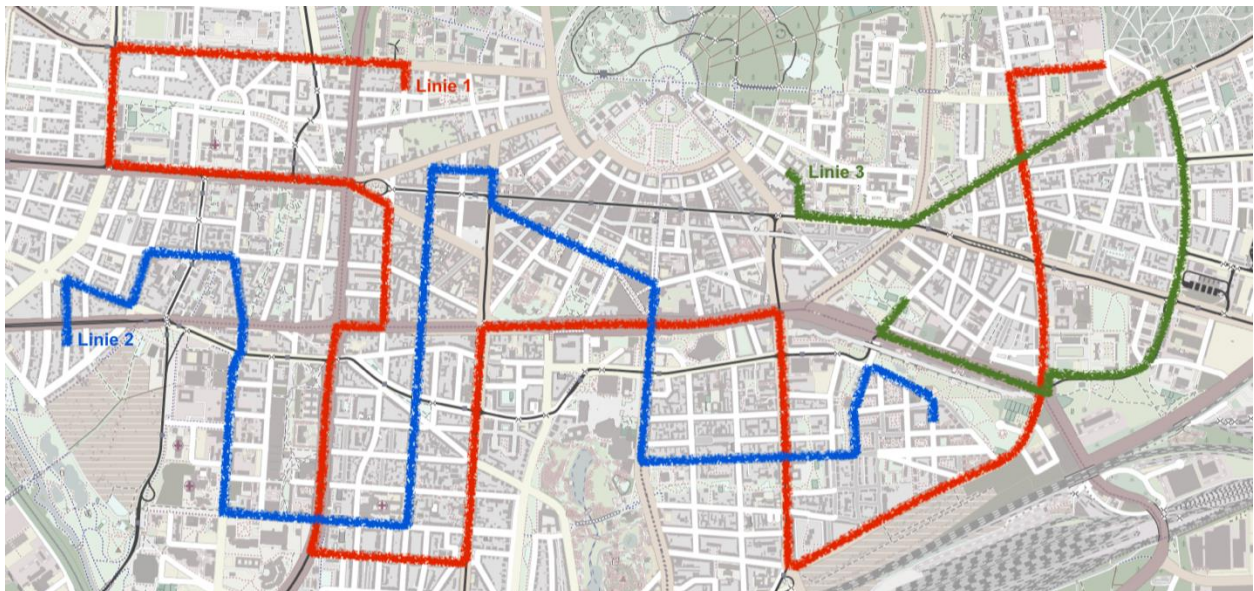
---

<sup>1</sup> Der Entfall der Gehaltskosten von Fahrern der Verkehrsunternehmen des ÖPNV führt zu einer wesentlichen Reduktion der Betriebskosten, was höhere Gewinne impliziert [6].



## 4.1 Fallstudie 1: Urbaner Linienverkehr

In der ersten Fallstudie werden elektrisch betriebene, autonome Linienbusse im Stadtverkehr betrachtet. Diese fahren, wie im heutigen ÖPNV üblich, im urbanen Verkehr auf vorgegebenen Routen festgelegte Haltestellen an. Vom äußeren Erscheinungsbild gleichen die Busse den heute in den Städten fahrenden Bussen, mit der Ausnahme, dass sich kein Fahrer an Bord befindet. In Abbildung 4 ist ein beispielhaftes Liniennetz dargestellt, auf dessen drei Linien die autonomen Busse verkehren. Die Abbildung dient dem Verständnis, wie sich die autonomen Busse im öffentlichen Stadtverkehr bewegen; nämlich immer stets auf der eingezeichneten Verbindung zwischen den Enden der jeweiligen Linie, ohne davon grundsätzlich abzuweichen.



**Abbildung 4:** Liniennetz des ÖPNV, auf dem die autonomen Linienbusse aus Fallstudie 1 verkehren (Straßenkarte aus [42])

Ein solcher Bus fährt selbstständig nach einem genau getakteten Fahrplan seine einzelnen Haltestationen an. Dabei kommt er grundsätzlich bei jeder Haltestelle an einer genau festgelegten Position zum Stehen und öffnet automatisch die Türen. Nach einer festgelegten Zeit gibt der Bus ein Signal an die Fahrgäste weiter, dass er weiterfahren möchte. Sollten die Türbereiche frei sein, schließt der Bus alle Türen und fährt ab.

Um die Effizienz der autonomen Busse im Stadtverkehr zu steigern, fahren die Linienbusse auf eigenen, für Busse des ÖPNV reservierten, Fahrspuren. Dadurch wird die Problematik des Mischverkehrs aus Fahrzeugen unterschiedlicher Automatisierungsgrade größtenteils umgangen (vgl. Kapitel 2.1.2). Gerade zu Stoßzeiten können dadurch die Linienbusse halbwegs unbeeinflusst

ihrem Fahrbetrieb nachgehen. Auch fällt dadurch die Interaktion mit anderen, nicht-autonomen Fahrzeugen im teilweise dichten Verkehr wesentlich leichter aus, was der grundsätzlich defensiven Programmierung der automatisierten Fahrzeuge zugute kommt (vgl. Kapitel 2.2.4). Des Weiteren ermöglichen alle Ampelanlagen auf den Fahrtrouten der drei Buslinien eine V2I-Kommunikation mit den autonomen Linienbussen. Nähert sich ein Bus der Ampel, wird dessen Fahrweg bevorzugt freigegeben und die Ampel wechselt auf grün, sodass für alle autonomen Busse prinzipiell eine grüne Welle im Stadtverkehr entsteht oder sie nur sehr kurze Wartezeiten an Ampeln haben.

#### **4.1.1 Anforderungen aus Nutzersicht**

Der wesentliche Punkt bei automatisierten Fahrzeugen im ÖPNV ist, dass diese den Anforderungen der Nutzer entsprechen müssen. Anderenfalls nehmen die Kunden das Angebot des ÖPNV nicht in Anspruch und die automatisierten Fahrzeuge wären letztlich überflüssig.

Da es sich in dieser Studie um autonome Linienbusse handelt, die nach vorgegebenen Fahrplänen fahren, sind Pünktlichkeit und Zuverlässigkeit für die Kunden von zentraler Bedeutung. Dies entspricht einer Anforderung, die bereits an aktuelle Fahrzeuge des ÖPNV gerichtet ist. Dazu zählt auch, dass Distanzen in möglichst kurzen Zeiten zurückgelegt werden, ansonsten könnten andere Verkehrsmittel wie das Fahrrad oder gar zu Fuß für die Nutzer von größerem Nutzen sein.

##### **ANFORDERUNG 1**

Die automatisierten Fahrzeuge müssen zuverlässig ihre Fahrpläne einhalten und mit einer für ein Fahrzeug im Stadtverkehr angemessenen Geschwindigkeit fahren können.

Autonome Busse sollten ein gutes Kommunikationskonzept für die Fahrzeug-Fahrgast-Kommunikation besitzen. Die Nutzer möchten über die Aktionen der Busse informiert werden, wie beispielsweise, wenn sich eine Tür öffnet oder schließt, wann die nächste Haltestelle erreicht wird und warum der Bus gerade stehen bleibt und auf etwas zu warten scheint. Da den Nutzern kein Fahrer mehr zur Verfügung steht, der ihnen bis jetzt Auskunft über die nächsten Haltestellen geben konnte, muss der autonome Bus jetzt die Fragen der Kunden beantworten können. Dies könnte beispielsweise über Bildschirme im Fahrgastraum realisiert werden.

**ANFORDERUNG 2**

Fahrerlose, selbstfahrende Busse müssen über ein effektives Fahrzeug-Mensch-Kommunikationskonzept verfügen, was den Informationsaustausch zwischen den Kunden und den autonomen Bussen ermöglicht.

Selbstverständlich legen die Nutzer ebenfalls großen Wert auf die Fahrsicherheit und den Fahrkomfort der autonomen Busse. Die Fahrzeuge sollen angemessen beschleunigen und bremsen. Hektische Fahrmanöver sollten unbedingt vermieden werden, da diese die Fahrgäste verängstigen und dazu veranlassen könnten, einen eingebauten Not-Halt-Knopf zu drücken (vgl. **ANFORDERUNG 33**).

**ANFORDERUNG 3**

Die automatisierten Busse müssen eine hohe Fahrsicherheit, einen hohen Fahrkomfort sowie eine für personenbefördernde Fahrzeuge angemessene Fahrweise aufweisen.

#### 4.1.2 Fahrzeugtechnische Anforderungen

Da sich die autonomen Busse im Stadtverkehr fortbewegen, wo beispielsweise Kinder am Straßenrand oder womöglich auf der Fahrbahn laufen und Fahrräder die Fahrbahn der Busse schneiden könnten, müssen die Fahrzeugsensoren eine zuverlässige Objekterkennung gewährleisten (vgl. Kapitel 2.2.2). Diese muss bei jeder Wetterlage gegeben sein, da sich die Busse im Linienverkehr bewegen, der unabhängig von Regen, Nebel oder Schnee verkehrt. Darüber hinaus ist zu beachten, dass alle Sensoren eine gewisse Ungenauigkeit in ihren Messergebnissen besitzen [21]. Deshalb muss die Zustandsunsicherheit über die Messergebnisse eines erkannten Objektes berücksichtigt werden und unter anderem durch eine geeignete Sensorkonfiguration so weit wie möglich minimiert werden (vgl. Kapitel 2.2.3).

**ANFORDERUNG 4**

Die automatisierten Fahrzeuge müssen über eine Sensorkonfiguration verfügen, die eine zuverlässige Objekterkennung in allen witterungsbedingten Situationen ermöglicht und die mit einhergehende Zustandsunsicherheit minimiert.

Eine alleinige Objekterkennung reicht allerdings nicht aus. Die Fahrzeuge müssen aus den erhobenen Daten auch erkennen können, ob es sich bei dem erkannten Objekt beispielsweise um

einen Kinderwagen, einen großen Pappkarton oder den Schatten eines Verkehrsschildes am Straßenrand handelt. Gerade in Situationen, wo das Fahrzeug über ein mögliches Ausweichen entscheiden muss, weil ein Stillstand bis zum erkannten Objekt nicht mehr möglich ist, spielt die Existenz- und Klassenunsicherheit eine entscheidende Rolle (vgl. Kapitel 2.2.3). Während bei einem Kinderwagen ein Ausweichmanöver erforderlich ist, ist bei einem Pappkarton ein Ausweichen nicht zwingend und bei einem Schatten ohnehin nicht erforderlich.

**ANFORDERUNG 5**

Automatisierte Fahrzeuge müssen eine zuverlässige Objektklassifizierung gewährleisten und mögliche Existenz- und Klassenunsicherheiten so weit wie möglich vermeiden.

Gerade im Stadtverkehr kommt es immer wieder zu Hindernissen auf der eigenen Fahrspur, wie nicht ordnungsgemäß geparkten Autos oder haltenden Lieferdiensten und Einsatzfahrzeugen, denen autonome Linienbusse ausweichen können müssen. Es reicht demnach nicht aus, dass sich die Fahrzeuge alleine auf ihren zugewiesenen Fahrspuren zuverlässig fortbewegen können.

**ANFORDERUNG 6**

Die automatisierten Fahrzeuge müssen vor ihnen liegende Hindernisse selbstständig und problemlos umfahren können.

Da die autonomen Linienbusse täglich für viele Stunden im Einsatz sind, müssen die Fahrzeugsensoren und -systeme eine hohe Robustheit im Sinne der Ausfallsicherheit aufweisen. Der vorübergehende Ausfall einzelner Sensoren darf das Fahrzeug vor keine ernsten Probleme stellen, sodass es womöglich ausfällt oder Fehlentscheidungen trifft. Sollte es während einer Fahrt im Linienverkehr zu Problemen kommen, muss sich das Fahrzeug selbstständig mit einer entsprechenden Einrichtung, wie beispielsweise der Werkstatt des Verkehrsbetriebes, in Kontakt setzen. Dazu ist es erforderlich, dass das Fahrzeug selbstständig auftretende Probleme erkennt und weiß, wie es mit diesen umzugehen hat. Sollten ernsthafte Probleme auftreten, die beispielsweise eine zuverlässige Objekterkennung verhindern, muss das Fahrzeug die Weiterfahrt unterbrechen und entsprechende Maßnahmen einleiten. Um eine hohe Ausfallsicherheit so gut wie möglich zu gewährleisten, ist eine regelmäßige Wartung des gesamten Fahrzeuges erforderlich.

**ANFORDERUNG 7**

Fahrzeugsensoren und -systeme automatisierter Fahrzeuge müssen durch eine geeignete Sensorkonfiguration sowie intelligente Algorithmen eine hohe Robustheit aufweisen.

**ANFORDERUNG 8**

Autonome Fahrzeuge müssen selbstständig auftretende technische Probleme am Fahrzeug erkennen und mit diesen umgehen können. Zur Vermeidung möglicher technischer Probleme müssen die Fahrzeuge in regelmäßigen Zeitabständen gewartet werden.

Ein weiterer Aspekt ist die Antriebstechnologie der automatisierten Busse im ÖPNV (vgl. Kapitel 2.3). Es muss gewährleistet sein, dass die Busse einem gewöhnlichen Betrieb im Linienverkehr nachgehen können, ohne zu häufig aufgeladen oder aufgetankt werden zu müssen. Da es sich in dieser Fallstudie um elektrisch betriebene Busse handelt, wie es bei allen derzeit bekannten autonomen (Klein-) Bussen der Fall ist, bestehen grundsätzlich zwei Lademöglichkeiten. Zum einen könnten die Busse während der Fahrt beispielsweise über Oberleitungen mit Elektrizität versorgt werden. Das wäre gerade in dieser Studie eine denkbare Option, da sich die Busse fast ausschließlich auf eigenen Fahrspuren bewegen, über diesen ein solches Oberleitungssystem angebracht werden könnte. Zum anderen könnten die autonomen Busse auch an dafür vorgesehene Ladestationen fahren, wenn ihre Reichweite gegen Null geht. Dabei muss beachtet werden, dass dies nicht während des Linienbetriebes vorkommt – die Fahrzeuge während ihrer Fahrten im ÖPNV also immer ausreichend aufgeladen sind.

**ANFORDERUNG 9**

Die Antriebstechnologie autonomer Fahrzeuge im ÖPNV sowie die Tank- bzw. Ladeinfrastruktur müssen den für den vorgesehenen Einsatz erforderlichen Energiebedarf decken können.

### 4.1.3 Infrastrukturelle Anforderungen

Jeder Linienbus hat eine fest vorgeschriebene Fahrtroute und benötigt daher eine digitale Karte, die ihm hochgenaue Informationen über die zu fahrende Fahrstrecke liefert. Da die Busse auf eigenen Fahrspuren fahren, können sie sich primär anhand der auf der Karte hinterlegten Daten orientieren. Das Fahrzeug vergleicht die mithilfe des GNSS gemessenen „Ist-Daten“ über die eigene Position mit den „Soll-Daten“ aus der digitalen Karte und fährt somit wie auf Schienen. Dass dies allein nicht ausreicht, geht aus **ANFORDERUNG 6** hervor. Die autonomen Fahrzeuge müssen auch in der Lage sein, Hindernissen auszuweichen und dafür ihre eigenen Fahrspuren zu verlassen. Dafür benötigen sie neben den Fahrzeugsensoren eine hochgenaue digitale Referenzkarte, auf der die Straßen und die Umgebung genauestens vermessen sind (vgl. Kapitel

2.3.2.4). Diese enthält beispielsweise auch Informationen über Baustellen auf der Busspur und mögliche Umleitungen, denen die Busse folgen sollen.

**ANFORDERUNG 10**

Die autonomen Fahrzeuge müssen über eine hochgenaue digitale Referenzkarte verfügen, die es ihnen ermöglicht, sich im Straßenverkehr auf ihren Fahrtrouten zu orientieren.

Des Weiteren müssen die autonomen Busse aufgrund der intelligenten Ampelanlagen über entsprechende V2I-Kommunikationsmöglichkeiten verfügen (vgl. Kapitel 2.3.2.2). Dadurch kann beispielsweise ein autonomer Bus, anstatt an einer roten Ampel zu warten, länger an der letzten Haltestelle warten, um verspätet eintreffenden Fahrgästen noch ein Mitfahren zu ermöglichen. Es handelt sich also um eine bidirektionale Kommunikation zwischen Infrastruktur und Fahrzeug in Echtzeit: das Fahrzeug meldet der Ampel, dass es in einer bestimmten Zeit eintreffen wird und die Ampel meldet dem Fahrzeug, wann sie frühestens auf „Grün“ wechseln kann.

**ANFORDERUNG 11**

Automatisierte Fahrzeuge im ÖPNV müssen für einen effizienten Linienverkehr mit entsprechenden V2I-Kommunikationsmöglichkeiten ausgestattet sein.

Durch den Austausch unzähliger Datenmengen zwischen den verschiedensten Systemen der informationstechnischen Infrastruktur besteht grundsätzlich die Gefahr, dass Daten während der Übertragung abgefangen werden. Die Daten müssen daher auch im Hinblick auf Manipulationen und Cyberattacken im Zuge der V2X-Kommunikation verschlüsselt werden [2]. Es muss dadurch zum einen das unbefugte Lesen der Daten, aber auch das Einschleusen von falschen Informationen zur Manipulation von Fahrzeugen verhindert werden.

**ANFORDERUNG 12**

Die Systeme automatisierter und vernetzter Fahrzeuge müssen über moderne Verschlüsselungsalgorithmen verfügen, die das Auslesen und Manipulieren von Daten durch Unbefugte verhindern.

#### 4.1.4 Anforderungen des ÖPNV

Eine große Chance für den ÖPNV besteht in der Flexibilisierung des Angebotes [6]. Obwohl der Linienverkehr relativ starr gestaltet ist, besteht die Möglichkeit, das Angebot an die Bedürfnisse

der Kunden anzupassen. So könnte die Anzahl an Bussen auf einer Linie der momentanen Nachfrage angepasst werden. Dazu könnten beispielsweise Sensoren an den Haltestellen die Nachfrage nach Sitz- und Stehplätzen in den Bussen der entsprechenden Linie ermitteln und mit dem durch Sensoren in den Bussen ermittelten Platzangebot vergleichen. Bei zusätzlichem Platzbedarf könnten so einzelne autonome Busse der Linie flexibel zugeteilt werden und die überschüssige Nachfrage aufnehmen. Daraus geht hervor, dass die autonomen Linienbusse sich nicht auf den Einsatz auf nur einer Linie beschränken dürfen, sondern für einen effizienten und kundenfreundlichen ÖPNV flexibel einsetzbar sein müssen.

**ANFORDERUNG 13**

Automatisierte Fahrzeuge im Linienverkehr des ÖPNV müssen flexibel auf allen Linien eingesetzt werden können.

Während es in heutigen Linienbussen des ÖPNV noch möglich ist, beim Fahrer eine Fahrkarte zu kaufen, ist dies bei autonomen Fahrzeugen nicht mehr möglich. Somit muss für autonome Busse ein neues Fahrkartensystem entwickelt werden. Die Möglichkeit, die Fahrkarten an Automaten in den Bussen oder an den Haltestellen zu kaufen, wie es in heutigen Straßenbahnen im ÖPNV möglich ist, ist eine Option. Eine weitere Option, wie sie beispielsweise in Dublin (Irland) vorzufinden ist, ist die Einführung eines fahrkartenlosen Konzepts [43]. Dabei kann jeder Kunde in zahlreichen Einkaufsläden der Städte des entsprechenden ÖPNV eine Prepaid Karte erwerben, auf die ein gewünschtes Guthaben gutgeschrieben werden kann. An den Stationen der öffentlichen Verkehrsmittel muss diese Karte beim Ein- und Aussteigen an ein Lesegerät gehalten werden, wodurch der Fahrpreis automatisch für die gefahrene Strecke ermittelt und abgebucht wird. Gerade in Bezug auf die autonomen, vernetzten Linienbusse dieser Fallstudie wäre ein solches Konzept sehr effizient.

**ANFORDERUNG 14**

Die autonomen Linienbusse müssen über ein automatisiertes Fahrkartensystem verfügen, das ohne die Anwesenheit eines Fahrers funktioniert.

#### 4.1.5 Rechtliche Anforderungen

Da das autonome Fahren auf öffentlichen Straßen generell noch nicht möglich ist, muss zunächst ein Rechtsrahmen geschaffen werden, in dem fahrerlose Fahrzeuge am Straßenverkehr teilnehmen dürfen. Die aktuelle Ausnahmeregelung nach § 70 StVZO reicht für diese Fallstudie nicht

aus, da es sich hierbei um fahrerlose Fahrzeuge handelt (vgl. Kapitel 2.1.5 und 3.3). Speziell in Deutschland müssen geltende Gesetze wie unter anderem die StVZO, Fahrzeug-Zulassungsverordnung (FZV), Straßenverkehrsordnung (kurz StVO) und das Personenbeförderungsgesetz (PBefG) so angepasst werden, dass der Betrieb fahrerloser, autonomer Busse im Linienverkehr möglich ist [18]. Dies entspricht allerdings einer Anforderung an den Gesetzgeber und weniger einer Anforderung an das automatisierte Fahrzeug. Sollte diese allerdings von Seiten des Gesetzgebers erfüllt werden, lässt sich daraus folgende Forderung implizieren.

**ANFORDERUNG 15**

Das autonome Fahrzeug muss grundsätzlich den Anforderungen des Gesetzgebers entsprechen und für den Personentransport geeignet sein.

Eine weitere Anforderung, die generell für alle autonomen Fahrzeuge gilt, ist die Beantwortung der Frage, wann ein autonomes Fahrzeug sicher genug für den Einsatz im Straßenverkehr ist [5]. Die automatisierten Fahrzeuge müssen den diesbezüglich geltenden rechtlichen Vorgaben entsprechen, die an die Hersteller gerichtet sind. Dabei geht es hier konkret um die Erfüllung einheitlicher Standards, die über die allgemein gültige **ANFORDERUNG 15** des Gesetzgebers an die Fahrzeuge hinausgehen.

Im Zuge dessen ist auch eine genaue Klärung der Haftungsfrage nötig (vgl. Kapitel 2.1.5). Da sich kein Fahrer mehr im Bus befindet, können nach dem heutigen Drei-Säulen-Modell nur noch der Halter oder der Hersteller haftbar gemacht werden. Es stellt sich die Frage, ob das autonome Fahrzeug in das Drei-Säulen-Modell mitaufgenommen werden soll, bzw. ob und inwieweit das Fahrzeug für entstandene Schäden verantwortlich gemacht werden kann und wer dafür letztendlich aufkommen muss. Zur Beantwortung der Frage, ob das selbstfahrende Fahrzeug für den Unfall verantwortlich ist, benötigt dieses einen sogenannten Unfalldatenspeicher. Dieser zeichnet genau auf, was das Fahrzeug vor dem Unfall gemacht hat. So kann herausgefunden werden, ob das Fahrzeug für den Unfall verantwortlich ist und welche Handlung des Fahrzeugsystems genau dazu geführt hat.



**ANFORDERUNG 16**

Das automatisierte Fahrzeug muss für einen sicheren Einsatz im Straßenverkehr den vom Gesetzgeber an die Hersteller gestellten (Sicherheits-) Standards entsprechen.

**ANFORDERUNG 17**

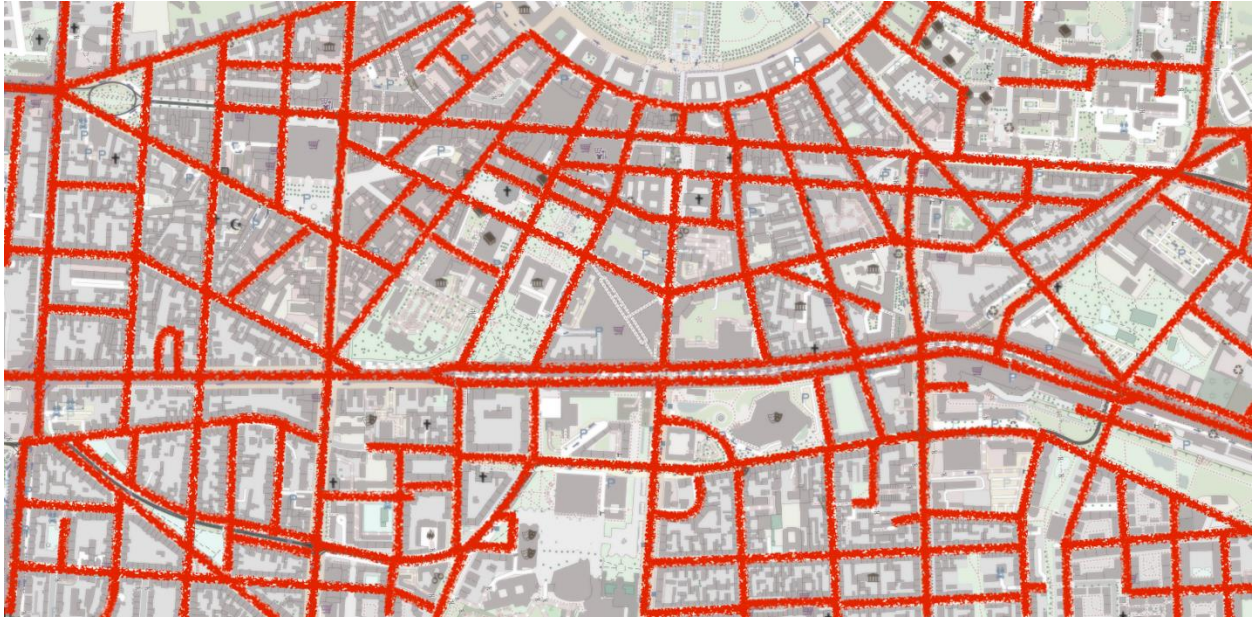
Das autonome Fahrzeug muss über einen Unfalldatenspeicher verfügen, aus dem im Falle eines Unfalls genau ausgelesen werden kann, welche Aktionen das Fahrzeug (-system) vor dem Unfall ausgeführt hat.

## **4.2 Fallstudie 2: Urbaner On-Demand Verkehr**

In der zweiten Fallstudie werden elektrisch betriebene, autonome Kleinbusse im Stadtverkehr betrachtet. Diese Kleinbusse mit jeweils sechs Sitzplätzen fahren alle nach dem sogenannten On-Demand-Prinzip, das heißt die Fahrgäste werden zu einer gewünschten Zeit an einem gewünschten Ort abgeholt und an das von ihnen genannte Ziel gefahren. Dabei beschränkt sich das Einsatzgebiet der Kleinbusse in dieser Fallstudie auf eine bestimmte Stadt; das Verlassen der Stadt mit einem der Fahrzeuge ist nicht möglich. Um die Effizienz der Fahrten im ÖPNV zu verbessern, fahren die Kleinbusse ausschließlich auf vorgegebenen Straßen. Dadurch wird beispielsweise verhindert, dass eines der Fahrzeuge in eine zu enge und unübersichtliche Sackgasse fährt, aus der es aufgrund ordnungswidrig geparkter Fahrzeuge ohne äußere Hilfe nicht wieder hinauskommt. In Abbildung 5 ist ein beispielhaftes Verkehrsnetz dargestellt, in dem die von den autonomen Kleinbussen befahrbaren Straßen eingezeichnet sind.

Die Kleinbusse fahren dabei rund um die Uhr. Das Rufen eines solchen Fahrzeuges kann über zwei Wege erfolgen. Zum einen stellen die Betreiber des ÖPNV eine kostenfreie Smartphone-Anwendung zur Verfügung. Über diese kann der gewünschte Abholort, Abholzeitpunkt und Zielort eingegeben werden. Zum anderen steht für Fahrgäste ohne Smartphone eine Service-Hotline zur Verfügung, über welche ebenfalls ein Bus herbeigerufen werden kann.

Den Fahrzeugen ist es dabei wie auch Taxis erlaubt, in zweiter Reihe zu halten, um die Fahrgäste ein- und aussteigen zu lassen.



**Abbildung 5:** Die roten Linien stellen das Verkehrsnetz des ÖPNV dar, auf dem die autonomen Kleinbusse aus Fallstudie 2 verkehren (Straßenkarte aus [42])

#### 4.2.1 Anforderungen aus Nutzersicht

Durch die Nutzung der autonomen Kleinbusse geben die Fahrgäste bewusst und unbewusst eine Vielzahl von personenbezogenen Daten preis (vgl. Kapitel 2.3.2.3). So weiß das System des ÖPNV, das die Daten verwaltet, beispielsweise nicht nur, wann und wo sich ein bestimmter Nutzer aufhält oder aufhalten wird, sondern auch mit welchen anderen Personen der Nutzer unterwegs ist. Da unter anderem durch die Fahrzeugsensoren auch Informationen über Personen im öffentlichen Raum um das Fahrzeug herum gesammelt, verarbeitet und übermittelt werden können, benötigt es im Sinne des Datenschutzes einen geeigneten Umgang mit diesen personenbezogenen Daten [44]. Gerade im städtischen Linienverkehr können aufgrund der vielen Menschen bereits in kürzester Zeit riesige Mengen personenbezogener Daten anfallen.

##### **ANFORDERUNG 18**

Die Fahrzeugsysteme müssen einen sicheren Umgang mit personenbezogenen Daten im Sinne des Datenschutzes gewährleisten, beispielsweise durch die Anonymisierung dieser Daten.

Da die autonomen Kleinbusse in dieser Fallstudie nicht an jeden beliebigen Zielort fahren können, kann es sein, dass das Ziel eines Kunden nicht direkt angefahren werden kann. Diese Situation kann beispielsweise auch auftreten, wenn das Ziel zwar an einer grundsätzlich von autonomen

Kleinbussen befahrbaren Straße liegt, aber im Moment des Eintreffens durch ein Fahrzeug der Müllabfuhr, eine Straßensperrung der Feuerwehr oder sonstiges nicht angefahren werden kann. Für diesen Fall muss gewährleistet sein, dass der Fahrgast dennoch in einer minimalen Entfernung zum ursprünglich gewünschten Zielort abgesetzt wird.

**ANFORDERUNG 19**

Sollte ein direktes Anfahren des vom Kunden gewünschten Zielortes nicht möglich sein, muss das autonome Fahrzeug in der Lage sein, die nächstmögliche Haltemöglichkeit mit einer minimalen Distanz zum ursprünglichen Zielort zu lokalisieren und anzufahren.

Das Konzept der autonomen Kleinbusse im ÖPNV sieht grundsätzlich nicht vor, dass eine Person in einem solchen Fahrzeug alleine vom Abholort zum gewünschten Zielort gefahren wird. Da ein solcher Kleinbus über sechs Sitzplätze verfügt, steht das Angebot des ÖPNV also mehreren Nutzern zur Verfügung. Dabei wird es in den wenigsten Fällen der Fall sein, dass alle potenzielle sechs Fahrgäste am gleichen Ort einsteigen. Eine typische Situation wird im Folgenden geschildert.

Der erste Nutzer bestellt über seine Smartphone-Anwendung einen autonomen Kleinbus zu seiner Position. Das Fahrzeug erkennt, dass es auf der Fahrstrecke zum Zielort des eingestiegenen Kunden an drei Straßen vorbeikommt, in denen jeweils ein weiterer Fahrgast einen autonomen Kleinbus bestellt hat. Daher sammelt das Fahrzeug diese drei Personen auf dem Weg zum ersten Zielort ein und berechnet gleichzeitig eine entsprechende Route, auf der die drei neuen Zielorte der zugestiegenen Nutzer liegen. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass für das „Einsammeln“ eines Fahrgastes kein unverhältnismäßig großer Umweg gefahren wird, was die Fahrzeit aller bereits im Bus sitzenden Fahrgäste verlängert. Der Fahrgast muss sich also auf die ihm beim Bestellen des autonomen Kleinbusses angegebene Ankunftszeit an seinem Zielort, unter Berücksichtigung eines kleinen Toleranzbereiches von beispielsweise fünf Minuten, verlassen können.

**ANFORDERUNG 20**

Das automatisierte Fahrzeug des ÖPNV muss den Fahrgästen beim Einsteigen eine verlässliche Auskunft über ihre Ankunftszeit geben, die sich auch durch eventuelle Umwege zu anderen Ein- und Ausstiegsorten nicht über eine gewisse Toleranz hinaus ändert.

### 4.2.2 Fahrzeugtechnische Anforderungen

Die autonomen Kleinbusse befinden sich grundsätzlich während aller ihrer Fahrten im urbanen Mischverkehr; das heißt, dass um sie herum Fahrzeuge anderer Automatisierungsgrade fahren (vgl. Kapitel 2.1.2). Sie müssen also unter anderem mit nicht-autonomen Fahrzeugen, an deren Steuer noch jeweils ein Fahrer sitzt, Fahrradfahrern und Fußgängern im Straßenverkehr interagieren. Die autonomen Fahrzeuge benötigen demnach ein geeignetes Umfeld-Kommunikationskonzept für entsprechende Mensch-Maschine-Interaktionen (vgl. Kapitel 2.2.4). Andere Verkehrsteilnehmer können nicht ohne weiteres erkennen, was das autonome Fahrzeug als nächstes machen wird. Dafür muss das Fahrzeug entsprechende Komponenten verbaut haben, die anderen Verkehrsteilnehmern unmissverständlich mitteilen, was das Fahrzeug möchte. So könnte beispielsweise ein an einer engen Straße stehendes Kind durch die Projektion eines Zebrastreifens auf die Fahrbahn dazu aufgefordert werden, die Straße zu überqueren, während das autonome Fahrzeug stehen bleibt. Oder durch das Ertönen eines akustischen Signals könnte Fahrradfahrern signalisiert werden, dass diese auf das autonome Fahrzeug acht nehmen und rücksichtsvoller fahren sollen.

#### **ANFORDERUNG 21**

Das autonome Fahrzeug muss über geeignete Systeme für eine unmissverständliche Mensch-Maschine-Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern verfügen.

Ein Problem autonomer Fahrzeuge im öffentlichen Verkehr stellt ihre defensive Programmierung dar (vgl. Kapitel 2.2.4). Gerade im Stadtverkehr kann es durch rücksichtslose Fahrradfahrer oder unaufmerksame Fußgänger, die die Straße überqueren, dazu kommen, dass das autonome Fahrzeug häufig abbremsen muss und dadurch anderen Verkehrsteilnehmern ungewollt Vorfahrt gewährt. Damit dies nicht ausgenutzt werden kann, darf sich das autonome Fahrzeug nicht zu defensiv verhalten. Dabei hat selbstverständlich weiterhin das Verhindern eines Unfalls höchste Priorität.

#### **ANFORDERUNG 22**

Das autonome Fahrzeug darf sich nicht durch eine zu defensive Fahrweise von anderen Verkehrsteilnehmern vorsätzlich ausbremsen lassen.

Für ein selbstständiges Fortbewegen der autonomen Kleinbusse im Stadtverkehr ist der Einsatz von KI notwendig (vgl. Kapitel 2.2.3). Gerade im Stadtverkehr kann es aufgrund der großen An-

zahl an verschiedensten Verkehrsteilnehmern zu einer nicht abschätzbaren Menge an Situationen kommen. Da die autonomen Busse im ÖPNV-Betrieb allerdings nicht einfach auf unbestimmte Zeit stehen bleiben und abwarten können, bis sich ihr Umfeld wieder einer bereits bekannten Situation anpasst, benötigen die Fahrzeuge geeignete Methoden des maschinellen Lernens [28].

**ANFORDERUNG 23**

Autonome Fahrzeuge benötigen eine leistungsstarke KI.

In Großstädten kann es durchaus vorkommen, dass Polizeibeamte oder Beamte der Feuerwehr kurzfristig die Verkehrssteuerung übernehmen. Dabei müssen die autonomen Fahrzeuge neben dem Einhalten geltender Vorschriften, beispielsweise dass Weisungen von Polizeibeamten Vorrang gegenüber Weisungen von Signalanlagen haben, auch mit den Gesten der Beamten umgehen können. Aus technischer Sicht ist dies keine einfache Aufgabe, da das Fahrzeug unter Umständen weder der Straßenführung bzw. den Fahrbahnmarkierungen, noch einer auf einer digitalen Karte des Fahrzeuges verzeichneten Strecke folgen kann. Das Fahrzeug muss die Weisung des Polizeibeamten also zuverlässig interpretieren können und sich daraufhin sicher fortbewegen können. Eine Möglichkeit für das autonome Fahrzeug wäre, sich am vorausfahrenden Fahrzeug zu orientieren. Davon kann allerdings nicht grundsätzlich ausgegangen werden, da womöglich nicht immer ein vorausfahrendes Fahrzeug existiert oder dieses den Weisungen nicht korrekt Folge leistet.

**ANFORDERUNG 24**

Autonome Fahrzeuge müssen die Weisungen von Polizeibeamten zuverlässig interpretieren und ausführen können.

### 4.2.3 Infrastrukturelle Anforderungen

Durch den Einsatz von mehreren autonom fahrenden Kleinbussen in derselben Stadt, wie es in dieser Fallstudie der Fall ist, bietet sich neben dem Einsatz der V2I-Kommunikation (vgl. **ANFORDERUNG 11**) auch der Einsatz der V2V-Kommunikation an. Es ist bei einer größeren Anzahl an autonomen Kleinbussen im ÖPNV durchaus der Fall, dass mehrere Fahrzeuge auf derselben Straße unterwegs sind. Erkennt ein autonomer Kleinbus einen Unfall oder ein anderes längerfris-

tiges Hindernis auf der Fahrbahn, kann es durch die Kommunikation mit den restlichen Kleinbussen dazu beitragen, dass diese den betroffenen Streckenabschnitt automatisch umfahren. Dieser positive Effekt für den ÖPNV-Verkehr kann durch an den Straßen stationär angebrachte Sensoren verstärkt werden, welche über die V2I-Kommunikation den autonomen Kleinbussen aktuelle Verkehrsinformationen zukommen lassen können.

**ANFORDERUNG 25**

Die autonomen Fahrzeuge müssen für einen effizienten Betrieb im ÖPNV mit V2V-Kommunikationsmöglichkeiten ausgestattet sein.

In der Beschreibung dieser Fallstudie wurde erwähnt, dass die autonomen Kleinbusse rund um die Uhr im Einsatz sind (vgl. Kapitel 4.2). Das trifft natürlich nur im Hinblick auf die Verfügbarkeit der Kleinbusse zu, denn nicht jeder Kleinbus fährt tatsächlich jeden Tag rund um die Uhr. Die Fahrzeuge benötigen Pausenzeiten, in denen sie aufgeladen, geputzt und gewartet werden können. Dazu steht den Fahrzeugen eine geeignete Ladeinfrastruktur oder geeignete Depot-Standorte zur Verfügung. Dabei muss ein jedes autonomes Fahrzeug selbst wissen, wann seine Einsatzzeit vorbei ist oder wann seine Reichweite gegen Null geht. Das Fahrzeug muss dabei auch beachten, dass es zuerst alle Einsatzfahrten beenden, also alle Fahrgäste an ihren gewünschten Zielen absetzen muss, bevor es zum Aufladen fährt. Das autonome Fahrzeug muss dabei immer seine Restreichweite im Blick behalten, um nicht mitten im Straßenverkehr liegen zu bleiben.

**ANFORDERUNG 26**

Die autonomen Fahrzeuge müssen nach dem Beenden ihrer Einsatzfahrten selbstständig und zur richtigen Zeit zum Aufladen oder ins Depot fahren.

Autonome Fahrzeuge müssen durch die Objekterkennung und Interpretation auch das zuverlässige Lesen von Verkehrsschildern im Straßenverkehr ermöglichen (vgl. **ANFORDERUNG 4** und **ANFORDERUNG 5**). Sie müssen selbstständig erkennen, wo sie beispielsweise eine Fahrspur nicht mehr befahren dürfen, wo eine neue Geschwindigkeitsbeschränkung gilt und wo sie wieder aufgehoben wird oder wo eine Vorfahrtsstraße anfängt und wo sie wieder aufhört. Dabei reicht es nicht aus, sich ausschließlich auf die auf einer digitalen Karte hinterlegten Informationen zu verlassen, da dem Fahrzeug auch temporäre oder neu aufgestellte Verkehrsschilder begegnen können.

**ANFORDERUNG 27**

Die autonomen Fahrzeuge müssen die an Fahrbahnen angebrachten Verkehrsschilder zuverlässig lesen und interpretieren können.

**4.2.4 Anforderungen des ÖPNV**

Wie bereits in **ANFORDERUNG 20** erwähnt, sieht es das Konzept der autonomen Kleinbusse im ÖPNV nicht vor, dass eine Person in einem solchen Fahrzeug alleine vom Abholort zum gewünschten Zielort gefahren wird. Um die Gesamtzahl der notwendigen autonomen Kleinbusse zu minimieren und den ÖPNV insgesamt effizienter zu machen, müssen die autonomen Fahrzeuge ihre Routen daher so wählen, dass möglichst viele Fahrgäste mitgenommen werden können. Dabei muss das Fahrzeug immer wissen, wie viele Fahrgäste sich bereits im Fahrzeug befinden und wie viele noch mitgenommen werden können.

**ANFORDERUNG 28**

Das automatisierte Fahrzeug des ÖPNV muss über effiziente Algorithmen für die Berechnung der optimalen Route verfügen, die alle Ein- und Ausstiegsorte der betreffenden Nutzer eines Fahrzeuges beinhaltet.

Bedingt durch die defensive Programmierung der autonomen Kleinbusse kann es dazu kommen, dass ein solches Fahrzeug absichtlich angehalten wird (vgl. Kapitel 2.2.4). Dies hätte negative Folgen für die ÖPNV-Betreiber sowie für alle anderen potenziellen Nutzer, da hierdurch ein geringes Angebot an autonomen Kleinbussen zur Verfügung steht. Einzelne Personen könnten in einer Seitenstraße autonome Kleinbusse zum Stehenbleiben zwingen, indem sie ihnen die Fahrbahn blockieren. Solchen Situationen dürfen die Fahrzeuge nicht hilflos ausgesetzt sein und müssen über geeignete Mittel verfügen, diesen Schwachpunkt zu kompensieren.

**ANFORDERUNG 29**

Autonome Fahrzeuge müssen über geeignete Instrumente verfügen, die einen durch ihre defensive Programmierung bedingten Missbrauch verhindern.

Es würde sich für die ÖPNV-Betreiber ebenfalls als hilfreich und sinnvoll erweisen, wenn die autonomen Kleinbusse mit einer im Fahrzeug verbauten Sprechstelle ausgestattet wären. Zum ei-

nen können sich die Fahrgäste bei fahrzeugseitigen Problemen an die Leitstelle des ÖPNV wenden. Dadurch könnten Beschädigungen am Fahrzeug, die dieses nicht selbst erkannt hat, beispielsweise eine gesprungene Frontscheibe durch einen Steinschlag, gemeldet werden. Auch könnte so bei einem medizinischen Notfall eines Fahrgastes im Fahrgastraum schnelle Hilfe angefordert werden, da die Leitstelle die genaue Position des Kleinbusses weitergeben kann. Zum anderen kann aber auch die Leitstelle selbst mit den Fahrgästen im Kleinbus Kontakt aufnehmen. Dies kann beispielsweise bei technischen Problemen am Fahrzeug, die dieses selbstständig an die Leitstelle übermittelt hat, hilfreich sein, sodass die Fahrgäste genaue Informationen oder Anweisungen erhalten können.

**ANFORDERUNG 30**

Die autonomen Fahrzeuge müssen mit einer Sprechstelle ausgestattet sein, über die die Fahrgäste mit der Leitstelle und umgekehrt in Kontakt treten können.

Ein Problem, das bei den autonomen Kleinbussen gerade bei abendlichen und nächtlichen Fahrten auftreten kann, ist Vandalismus. Dagegen können unter anderem „Abschreck-Maßnahmen“, wie die Installation von Videokameras, helfen [45]. Diese könnten unter Berücksichtigung von Datenschutzregelungen das Geschehen im Fahrgastraum und der direkten Fahrzeugumgebung aufzeichnen. Sollten Anzeichen von Vandalismus erkennbar sein, kann das Fahrzeug oder die Leitstelle umgehend die Polizei informieren und das nötige Beweismaterial in Form von Videoaufzeichnungen übermitteln.

**ANFORDERUNG 31**

Die automatisierten Fahrzeuge müssen unter Berücksichtigung des Datenschutzes mit geeigneten Maßnahmen zur Erkennung und Prävention von Vandalismus ausgestattet sein.

#### **4.2.5 Rechtliche Anforderungen**

Da die autonomen Fahrzeuge in jeder Sekunde eigenständige Entscheidungen treffen, können diese bei Fehlentscheidungen auch Unfälle verursachen. Dabei folgt ein autonomes Fahrzeug unterschiedlichsten Regeln. Unter anderem müssen autonome Fahrzeuge wie alle anderen Fahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr den Regeln der StVO folgen, müssen aber auch auf ethischen Grundsätzen basierenden Regeln folgen (vgl. Kapitel 2.1.4). Das Einhalten aller Regeln gleichzeitig ist dabei nicht in jeder Situation möglich, sodass es zu ethischen Dilemmata kommen



kann. Jeder autonome Kleinbus muss in der Lage sein, anhand der ihm vorliegenden Regeln zu jeder Zeit eine für alle Verkehrsteilnehmer optimale Lösung zu finden.

**ANFORDERUNG 32**

Das autonome Fahrzeug muss anhand des ihm vorgegebenen Regelwerkes in jeder Situation eine optimale Lösung zugunsten aller beteiligten Verkehrsteilnehmer finden.

Da zwischen zwei Stopps der autonomen Kleinbusse deutlich mehr Zeit als im Linienbetrieb vergehen kann, kann es aus rechtlicher Sicht erforderlich sein, die Fahrzeuge mit einer Not-Halt-Einrichtung auszustatten. Hierdurch können Fahrgäste das automatisierte Fahrzeug im Notfall zum Anhalten zwingen und entsprechende Notfall-Protokolle aktivieren. Beispielsweise könnte das Drücken eines verbauten Not-Halt-Knopfes im Fahrgastraum das Fahrzeug dazu veranlassen, unverzüglich an den Fahrbahnrand zu fahren, die Warnblinkanlage einzuschalten, einen Notruf abzusetzen und die Fahrzeugtüren zu öffnen.

**ANFORDERUNG 33**

Die automatisierten Fahrzeuge müssen mit einer Not-Halt-Einrichtung ausgestattet sein.

Darüber hinaus ist es möglicherweise erforderlich, dass das Fahrzeug mit einer entsprechenden Notfallausrüstung ausgestattet ist. Sollte es während der Fahrt zu einem Feuer im Fahrgastraum kommen, können verschiedene Notfallausrüstungen und -einrichtungen erforderlich sein, die den Fahrgästen im Notfall zur Verfügung stehen. Neben dem Not-Halt-Knopf, der das Fahrzeug unverzüglich zum Stillstand bringt, sollte das Fahrzeug in jedem Fall zusätzlich über einen Feuerlöscher, eine Tür-Notentriegelung und an den Fenstern angebrachte Nothammer verfügen. Der Feuerlöscher kann von einem Fahrgast zur Brandbekämpfung vor dem Einrücken der Feuerwehr genutzt werden. Falls die Elektronik des Fahrzeuges ausfallen sollte, kann über die Tür-Notentriegelung die Fahrzeugtür manuell geöffnet werden. Sollte die Tür weiterhin blockiert sein oder ein Verlassen des Fahrzeuges beispielsweise aufgrund eines Brandes im Türbereich nicht möglich sein, können mit Hilfe der Nothammer die Fensterscheiben eingeschlagen und nach außen gedrückt werden, sodass ein Ausstieg durch die Fenster möglich ist.

**ANFORDERUNG 34**

Die automatisierten Fahrzeuge müssen über geeignete Notfalleinrichtungen verfügen, die ein Verlassen des Fahrzeuges im Notfall und eine Brandbekämpfung im Fahrzeuginneren ermöglichen.

### 4.3 Fallstudie 3: Suburbaner Zu- und Abbringerverkehr On-Demand

In der dritten Fallstudie werden autonome Kleinbusse im suburbanen Raum betrachtet. Dabei sind alle Kleinbusse einem genauen Gebiet zugeordnet, das an jeweils mindestens einem Punkt mit einem stationären Verkehrsnetz des ÖPNV verbunden ist, welches unter anderem den suburbanen Raum mit den Städten verbindet. Ein beispielhaftes Verkehrsnetz ist in Abbildung 6 dargestellt. Dabei stellen die blauen Linien das stationäre, mit den umliegenden Städten verbundene Verkehrsnetz dar. Die rot-transparenten Kreise stellen die Gebiete dar, denen jeweils eine bestimmte Anzahl an autonomen Kleinbussen zugeteilt ist. Die kleinen roten Punkte innerhalb eines solchen Gebietes verbinden das Gebiet mit dem stationären Verkehrsnetz. Somit stellen die autonomen Fahrzeuge Zu- und Abbringer des stationären ÖPNV-Netzes für die „letzte Meile“ dar und binden den ländlichen Raum an das bestehende ÖPNV-Angebot an.



**Abbildung 6:** Verkehrsnetz des ÖPNV. Die blauen Linien stellen ein stationäres Liniennetz dar; die roten Bereiche werden von den autonomen Kleinbussen aus Fallstudie 3 abgedeckt und sind über die eingezeichneten roten Punkte mit dem stationären Liniennetz verbunden (Straßenkarte aus [42])

Darüber hinaus fahren die autonomen Kleinbusse wie in Fallstudie 2 nach dem On-Demand-Prinzip und sind rund um die Uhr im Einsatz.

### 4.3.1 Anforderungen aus Nutzersicht

Ein großer Aspekt im suburbanen Raum stellt die Verfügbarkeit der autonomen Kleinbusse dar. Da Nutzern auf dem Land in der Regel keine große Auswahl an ÖPNV-Angeboten zur Verfügung steht, sind sie auf die wenigen ihnen zur Verfügung stehenden Angebote angewiesen. Es muss demnach gewährleistet sein, dass sich eine der Menge potenzieller Nutzer entsprechende Anzahl an autonomen Kleinbussen in jedem Gebiet befindet, die die Nachfrage befriedigen kann. Dabei spielt auch die Verlässlichkeit eine Rolle, sodass eine Person nachts im Dunkeln nicht auf ungewisse Zeit auf einen Kleinbus warten muss, sondern sich darauf verlassen kann, dass sie in kürzester Zeit abgeholt wird.

#### **ANFORDERUNG 35**

Die autonomen Fahrzeuge des ÖPNV müssen eine hohe Verfügbarkeit aufweisen und den Nutzern in der kürzest möglichen Zeit zur Verfügung stehen.

Gerade in der heutigen Zeit wird das umweltfreundliche und (lokal) emissionsfreie Fahren für die Menschen immer wichtiger. Daher ist es unter anderem den Nutzern im ländlichen Raum wichtig, dass die autonomen Kleinbusse lokal emissionsarm fahren und wenig Abgase in die Natur bringen. Eine Möglichkeit dafür wären die bereits in der zweiten Fallstudie verwendeten, elektrisch betriebenen, autonomen Kleinbusse.

#### **ANFORDERUNG 36**

Die automatisierten Fahrzeuge im ÖPNV sollen über eine emissionsarme Antriebstechnologie verfügen.

Für Menschen mit einer Gehbehinderung ist gerade im ländlichen Raum eine selbstständige Fortbewegung nur stark eingeschränkt möglich, weshalb diese auf behindertengerechte Angebote des ÖPNV angewiesen sind. Dazu muss diesen Nutzern ein barrierefreies Ein- und Aussteigen seitens des autonomen Kleinbusses gewährleistet werden. In heutigen Testprojekten mit autonomen Bussen, die sich hauptsächlich im Stadtverkehr bewegen, sind dafür barrierefreie Haltestellen und eine manuell ausfahrbare Rampe am Fahrzeug angedacht [46]. Da die autonomen Kleinbusse dieser Fallstudie allerdings nicht an konkreten Haltestellen halten und somit kein genereller barrierefreier Ein- und Ausstieg garantiert werden kann, ist eine fahrzeugseitige Bewältigung dieses Problems erforderlich. Eine manuelle Rampe stellt dabei gerade im suburbanen Raum keine Alternative dar, da es in Bezug auf das On-Demand-Prinzip möglich ist, dass ein gehbehinderter

Nutzer alleine unterwegs ist. Somit ist eine automatisch ausfahrbare Rampe erforderlich. Alternativ könnte das autonome Fahrzeug auch über ein absenkbares Fahrwerk verfügen, welches sich soweit absenken lässt, dass Nutzer das Fahrzeug problemlos mit einem Rollstuhl betreten und verlassen können.

**ANFORDERUNG 37**

Die automatisierten Fahrzeuge des ÖPNV müssen ihrerseits über eine automatische Einrichtung verfügen, die ein barrierefreies Ein- und Aussteigen ermöglicht.

### 4.3.2 Fahrzeugtechnische Anforderungen

In ländlichen Gegenden kommt es nicht selten vor, dass neben menschlichen Verkehrsteilnehmern auch Tiere die Fahrbahn überqueren oder auf dieser stehen bleiben. Es muss zunächst gewährleistet sein, dass das autonome Fahrzeug diese zuverlässig erkennt. Dabei muss beachtet werden, dass Tiere, die auf dem Land frei umherlaufen können, wie beispielsweise Katzen, Hunde oder Hühner, deutlich kleiner als Menschen sind.

Zum anderen könnte über die Objekterkennung hinaus auch eine Kommunikation mit auf die Fahrbahn laufenden Tieren notwendig sein. Gerade nachts auf Landstraßen können Tiere wie beispielsweise Rehe oder Wildschweine auf die Fahrbahn treten, die im Lichtstrahl der Fahrzeugscheinwerfer des autonomen Kleinbusses stehen bleiben. Sollte das Tier nicht ohne weiteres weglaufen, muss das autonome Fahrzeug über geeignete Methoden verfügen, die das Tier dazu bewegen, die Fahrbahn zu verlassen. Eine von vielen möglichen Optionen wäre es, die Außenscheinwerfer zu dimmen und ein akustisches Signal ertönen zu lassen.

**ANFORDERUNG 38**

Die autonomen Fahrzeuge müssen im Rahmen der Objekterkennung zuverlässig Tiere wahrnehmen können, mit denen eine Kollision droht.

**ANFORDERUNG 39**

Autonome Fahrzeuge müssen über geeignete Kommunikationsmethoden für auf die Fahrbahn gelaufene Tiere verfügen.

### 4.3.3 Infrastrukturelle Anforderungen

Fehlende oder schlecht sichtbare Fahrbahnmarkierungen sind auf Straßen im suburbanen Raum keine Seltenheit. Dennoch muss das autonome Fahrzeug in der Lage sein, auch auf solchen Straßen sicher zu fahren. Ein wichtiges Instrument dafür ist die in **ANFORDERUNG 10** genannte digitale Referenzkarte (vgl. Kapitel 2.3.2.4).

#### **ANFORDERUNG 40**

Das automatisierte Fahrzeug muss sich auch bei schlecht sichtbaren oder nicht vorhandenen Fahrbahnmarkierungen sicher fortbewegen können.

Neben Straßen mit fehlenden Fahrbahnmarkierungen, auf denen das autonome Fahrzeug dennoch sicher fahren können muss, gibt es im ländlichen Raum aber auch Straßen, die Fahrbahnmarkierungen haben, auf denen das Fahrzeug aber nicht fahren sollte. Dazu zählen zum Beispiel zu enge Straßen, Straßen mit einer zu hohen Steigung oder einem zu hohen Gefälle oder Wege mit einer für das Fahrzeug ungeeigneten Fahrbahnoberfläche. Das autonome Fahrzeug muss selbstständig durch die eigenen Fahrzeugsensoren und Daten aus digitalen Referenzkarten oder einer V2X-Kommunikation erkennen können, welche Straßen oder Wege es befahren kann und welche nicht. Dies muss auch dem Fahrgast mitgeteilt werden, falls sein Ziel beispielsweise auf einer für das Fahrzeug zu engen Straße liegt und dieses daher nicht direkt angefahren werden kann.

#### **ANFORDERUNG 41**

Das automatisierte Fahrzeug muss für das Fahrzeug unbefahrbare Straßen selbstständig erkennen können.

Gerade im ländlichen Raum kann es vorkommen, dass spezielle Übertragungstechnologien für kurze oder längere Zeit nicht zur Verfügung stehen. Für das autonome Fahren ist ein vernetzter Datenaustausch allerdings von großer Bedeutung (vgl. Kapitel 2.3.2.1). So darf beispielsweise bei Unterbrechungen in der Mobilfunkabdeckung nicht die sichere Weiterfahrt oder zumindest der sichere Halt des autonomen Fahrzeuges beeinträchtigt werden. Das Fahrzeug muss mit einer solchen Situation umgehen können und darf durch die fehlenden Informationen der Infrastruktur keine Unsicherheiten in seinem Betrieb zulassen.

**ANFORDERUNG 42**

Autonome Fahrzeuge müssen mit Unterbrechungen bei Übertragungstechnologien der V2X-Kommunikation rechnen und weiterhin einen sicheren Betrieb gewährleisten.

**4.3.4 Anforderungen des ÖPNV**

Dadurch, dass die autonomen Kleinbusse den ländlichen Raum mit dem ÖPNV-Liniennetz verbinden, ist es von Seiten des ÖPNV wichtig, dass diese beiden Angebote miteinander kompatibel sind. Die Fahrzeuge des Liniennetzes haben feste Fahrpläne, sodass bekannt ist, wann diese die Verbindungspunkte zwischen dem Liniennetz und den Gebieten der autonomen Kleinbusse erreichen. Es wäre nicht sinnvoll, wenn zum Zeitpunkt des Eintreffens eines solchen Linienfahrzeuges an einem Verbindungspunkt kein autonomer Kleinbus in entsprechender Entfernung zur Verfügung steht. Somit ist es sinnvoll, wenn die autonomen Kleinbusse, beispielsweise durch eine entsprechende V2V-Kommunikation, mit den Linienfahrzeugen interagieren können. Darüber hinaus wäre es für den ÖPNV noch effizienter, wenn den autonomen Kleinbussen mitgeteilt werden würde, wie viele Personen an einem Verbindungspunkt aussteigen werden. So könnten auch Fahrgäste, die noch keinen autonomen Kleinbus bestellt haben, aufgrund der hohen Verfügbarkeit in der nahen Umgebung dazu veranlasst werden, einen solchen zu bestellen.

**ANFORDERUNG 43**

Die autonomen Fahrzeuge des ÖPNV müssen miteinander interagieren können, um die Kompatibilität verschiedener ÖPNV-Angebote zu gewährleisten und ein für alle Nutzer besseres Gesamtangebot zu ermöglichen.

Gerade auf dem Land sind die autonomen Kleinbusse, bedingt durch das geringere ÖPNV-Angebot als in Städten, für viele Altersgruppen von Relevanz, um sich flexibel fortbewegen zu können. Deshalb ist es wichtig, dass die autonomen Fahrzeuge für Kinder, Erwachsene und ältere Menschen attraktiv sind. Insbesondere bei der Fahrzeug-Mensch-Kommunikation spielt dies eine entscheidende Rolle. Gerade für ältere Menschen, die generell ein geringeres technisches Verständnis haben, müssen die autonomen Kleinbusse klare und einfache Bedienkonzepte für beispielsweise einen im Fahrzeug verbauten Touchscreen-Monitor besitzen. Auch in Bezug auf Kinder müssen die Fahrzeuge in ihrer Kommunikation einen verständlichen und einfachen Wortschatz verwenden.

**ANFORDERUNG 44**

Autonome Fahrzeuge des ÖPNV müssen ein für alle Altersgruppen gerechtes Kommunikationskonzept zwischen Fahrzeug und Mensch besitzen.

**4.3.5 Rechtliche Anforderungen**

Sollte ein autonomer Kleinbus auf einer Landstraße aufgrund eines Defektes zum Stehen kommen und nicht mehr weiterfahren können, kann es erforderlich sein, den Verkehr durch ein Warndreieck und eine Warnleuchte frühzeitig zu warnen. Nach aktueller Rechtslage ist für alle Kraftfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht von über 3,5 Tonnen nach § 53a StVZO das Mitführen eines Warndreieckes und einer Warnleuchte verpflichtend [47]. Da bei autonomen Fahrzeugen allerdings kein Fahrer an Bord ist, der das Warndreieck sowie die Warnleuchte aufstellen kann, muss entweder ein Fahrgast diese Aufgabe übernehmen oder das Fahrzeug muss über andere, mit dem Gesetz vereinbare, Einrichtungen verfügen, die von der Verwendung eines Warndreieckes und einer Warnleuchte absehen. Die Option, einen Fahrgast die Warneinrichtungen auf der Fahrbahn platzieren zu lassen, kann nicht als grundsätzliche Regelung vorgesehen werden, da die autonomen Kleinbusse auch ohne Fahrgäste unterwegs sein können. Somit ist neben der Anpassung des § 53a StVZO auch die Installation entsprechender Warneinrichtungen am autonomen Fahrzeug erforderlich. Ein Beispiel dafür könnten am Fahrzeug verbaute, sehr helle Warnleuchten mit einem Außenlautsprecher für akustische Warnsignale sein. Andere automatisierte Fahrzeuge könnten zusätzlich per V2X-Kommunikation gewarnt werden.

**ANFORDERUNG 45**

Autonome Fahrzeuge müssen über mit dem Gesetz vereinbare Warneinrichtungen verfügen, die den Einsatz von Warndreieck und Warnleuchte ersetzen.

## 5 Fallstudienanalyse

In diesem Kapitel werden die in den Kapiteln 4.1, 4.2 und 4.3 eingeführten Fallstudien und ihre automatisierten Fahrzeuge auf ihre Herausforderungen hin analysiert. Ziel der Analyse ist es, zu untersuchen, vor welchen Herausforderungen die automatisierten Fahrzeuge der Fallstudien stehen, wie groß diese im Vergleich zwischen allen drei Fallstudien sind und welche Fallstudie letztendlich vor den größten Herausforderungen steht.

### 5.1 Methoden der Fallstudienanalyse

Im Folgenden werden drei Methoden zur Durchführung einer Fallstudienanalyse entwickelt. Diese werden in den Kapiteln 5.1.1, 5.1.2 und 5.1.3 jeweils allgemein beschrieben sowie auf allgemeine Vor- und Nachteile hin untersucht. In Kapitel 5.1.4 folgt ein Vergleich der drei Methoden sowie die Auswahl einer Methode für die Fallstudienanalyse.

Eine Methode beschreibt ein genaues Vorgehen zur Analyse eines Kontextes. Dabei stehen mehrere (Entscheidungs-) Alternativen verschiedenen Kriterien gegenüber, anhand derer die Alternativen untersucht werden. Als Ergebnis liefert die Methode einen Vergleichswert für jede Alternative, aus denen sich die präferierte Alternative der Methode ermitteln lässt.

#### 5.1.1 Methode 1: Direktes Vergleichsverfahren

Die Methode des direkten Vergleiches führt für jedes Kriterium einen direkten Vergleich der unterschiedlichen Alternativen durch, indem ausschließlich die Alternative ausgewählt wird, die dem gestellten Kriterium am besten entspricht.

Dabei werden  $n$  verschiedene Alternativen  $i \in \{1, \dots, n\}$  auf Basis von  $m$  unterschiedlichen Kriterien  $j \in \{1, \dots, m\}$  verglichen. Zur Durchführung wird eine Tabelle mit  $n$  Spalten und  $m$  Zeilen erstellt, in der jedes Kriterium  $n$  unterschiedlichen Alternativen gegenüber steht (siehe Tabelle 2). Für jedes Kriterium  $j$  wird dabei entschieden, welche Alternative  $i$  diesem am besten entspricht. Die entsprechende Alternative  $i$  bekommt den Eintrag  $x_{i,j} = 1$ , alle anderen Alternativen bekommen den Eintrag  $x_{i,j} = 0$  für das betrachtete Kriterium  $j$ .



Für die Einträge der Tabelle gilt somit formal: Eintrag  $x_{i,j} \in \{0,1\}$  mit  $\sum_{i=1}^n x_{i,j} = 1 \quad \forall j \in \{1, \dots, m\}$ . Die Alternative mit der höchsten Spaltensumme entspricht der, anhand dieser Methode ermittelten, präferierten Alternative.

Formal gilt: *Alternative k ist präferierte Alternative*  $\Leftrightarrow \sum_{j=1}^m x_{k,j} > \sum_{j=1}^m x_{i,j} \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \setminus \{k\}, k \in \{1, \dots, n\}$ .

		<b>Alternativen</b>			
		Alternative 1	Alternative 2	...	Alternative n
<b>Kriterien</b>	Kriterium 1	$x_{1,1}$	$x_{2,1}$	...	$x_{n,1}$
	Kriterium 2	$x_{1,2}$	$x_{2,2}$	...	$x_{n,2}$
	...	...	...	...	...
	Kriterium m	$x_{1,m}$	$x_{2,m}$	...	$x_{n,m}$
		$\sum_{j=1}^m x_{1,j}$	$\sum_{j=1}^m x_{2,j}$	...	$\sum_{j=1}^m x_{n,j}$

**Tabelle 2:** Schema von Methode 1 (Direktes Vergleichsverfahren)

Die Methode des direkten Vergleiches bietet folgende **Vorteile**:

- ▶ Die Durchführung dieser Methode ist nicht zeitintensiv und kann zu einer schnellen Entscheidungsfindung beitragen.
- ▶ Aufgrund der klaren Zuordnung eines Kriteriums zu genau einer Alternative zeigt das Ergebnis der Methode, welche Alternative die meisten Kriterien erfüllt.

Dabei ergeben sich folgende **Nachteile**:

- ▶ Die Kriterien gehen alle mit der gleichen Gewichtung in das Ergebnis ein. Es besteht nicht die Möglichkeit, diese unterschiedlich zu priorisieren bzw. zu gewichten.
- ▶ Ein Kriterium muss immer genau einer Anforderung zugeordnet werden. Dabei kann es durchaus sein, dass ein Kriterium auf zwei Alternativen gleichermaßen zutrifft oder möglicherweise auf gar keins. Dies wird nicht berücksichtigt.
- ▶ Das Verfahren ist sehr subjektiv, wodurch das Ergebnis je nach durchführender Person unterschiedlich ausfallen kann.

- ▶ Es werden nicht die verschiedenen Alternativen einzeln auf ihre Erfüllung der Kriterien untersucht; es wird ausschließlich verglichen, welche Alternative einem bestimmten Kriterium am besten entspricht.
- ▶ Die Ergebnisse der einzelnen Alternativen können daher schlecht miteinander verglichen werden.

### 5.1.2 Methode 2: Gewichtetes Rangfolgeverfahren

Das gewichtete Rangfolgeverfahren bezeichnet eine Methode, die sowohl die verschiedenen Kriterien anhand entsprechender Gewichtungen unterschiedlich in das Ergebnis miteinbringt, als auch die Alternativen mithilfe von Rangzahlen unterschiedlich priorisiert.

Dabei werden die  $m$  unterschiedlichen Kriterien  $j \in \{1, \dots, m\}$  jeweils mit einer entsprechenden Gewichtung  $w_j \in \mathbb{R} : 0 < w_j \leq 1$  versehen. Für die Summe aller Gewichtungen gilt:  $\sum_{j=1}^m w_j = 1$ . Das heißt, dass die Summe aller Gewichtungen 100 Prozent ergeben muss. Für jedes Kriterium  $j$  wird unter den verschiedenen Alternativen  $i \in \{1, \dots, n\}$  eine Rangfolge mit den Zelleneinträgen  $x_{i,j} \in \{1, \dots, n\}$  festgelegt, wobei jede Rangnummer nur einmal pro Kriterium vergeben werden darf. Das heißt, dass für jedes Kriterium genau festgelegt wird, in welcher Reihenfolge die Alternativen dem Kriterium am besten entsprechen, wobei Rang  $x_{i,j} = 1$  für ein gegebenes  $j$  am besten und  $x_{i,j} = n$  für ein gegebenes  $j$  am schlechtesten ist.

Die Alternative mit der höchsten Spaltensumme  $\sum_{j=1}^m z_{i,j}$  mit  $z_{i,j} = w_j * (n - x_{i,j} + 1)$  entspricht der anhand dieser Methode präferierten Alternative. Die Umrechnung der  $x_{i,j}$  in  $z_{i,j}$  ist erforderlich, da die Alternative mit dem höchsten Rang die hier numerisch niedrigste Zahl (die Eins) besitzt. Damit die Alternative mit den höchsten Rängen auch die höchste Spaltensumme erhält, werden die Einträge durch  $z_{i,j}$  „umgedreht“ und gleichzeitig gewichtet. Das heißt die Alternative mit dem höchsten Rang ( $x_{i,j} = 1$ ) erhält bei einer Gewichtung  $w_j = 1$  die größte mögliche numerische Zahl ( $z_{i,j} = n$ ). Die Alternative mit dem zweithöchsten Rang ( $x_{i,j} = 2$ ) erhält bei einer Gewichtung  $w_j = 1$  die zweitgrößte mögliche numerische Zahl ( $z_{i,j} = n - 1$ ) und so weiter.

Formal gilt: *Alternative  $k$  ist präferierte Alternative*  $\Leftrightarrow \sum_{j=1}^m z_{k,j} > \sum_{j=1}^m z_{i,j} \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \setminus \{k\}$ ,  $k \in \{1, \dots, n\}$  mit  $z_{k,j} = w_j * (n - x_{k,j} + 1)$  und  $z_{i,j} = w_j * (n - x_{i,j} + 1)$ .

		Alternativen (kurz Alternat.)				
		Gewichtung	Alternat. 1	Alternat. 2	...	Alternat. n
Kriterien	Kriterium 1	$w_1$	$x_{1,1}$	$x_{2,1}$	...	$x_{n,1}$
	Kriterium 2	$w_2$	$x_{1,2}$	$x_{2,2}$	...	$x_{n,2}$
	...	...	...	...	...	...
	Kriterium m	$w_m$	$x_{1,m}$	$x_{2,m}$	...	$x_{n,m}$
			$\sum_{j=1}^m z_{1,j}$	$\sum_{j=1}^m z_{2,j}$	...	$\sum_{j=1}^m z_{n,j}$

**Tabelle 3:** Schema von Methode 2 (Gewichtetes Rangfolgeverfahren)

Die Methode des gewichteten Rangfolgeverfahrens bietet folgende **Vorteile**:

- ▶ Die Kriterien gehen mit unterschiedlichen Gewichtungen in das Ergebnis mit ein, wodurch eine differenzierte Bewertung möglich ist.
- ▶ Die Alternativen werden priorisiert, sodass jedes Kriterium in das Ergebnis einer Alternative miteinfließt.
- ▶ Die Ergebnisse der einzelnen Alternativen können daher gut miteinander verglichen werden.
- ▶ Das Verfahren ist relativ transparent, da durch die Reihenfolge ein klarer Vergleich der einzelnen Alternativen eines Kriteriums möglich ist und so ein weniger subjektives Ergebnis entsteht.

Daneben sind folgende **Nachteile** ersichtlich:

- ▶ Durch die relative Bewertung der Alternativen ist es nicht möglich, im Ergebnis zu berücksichtigen, dass eine Alternative ein Kriterium gar nicht erfüllt.
- ▶ Mehrere Alternativen können ein Kriterium nicht gleich gut oder schlecht erfüllen.

### 5.1.3 Methode 3: Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse ist eine weit verbreitete, quantitative Analysemethode, in der für jede einzelne Alternative eines betrachteten Kriteriums ein sogenannter Nutzwert vergeben wird. Die Summe aller Nutzwerte einer Alternative ergibt den Gesamtnutzwert. Die Alternative mit dem höchsten Gesamtnutzwert stellt sich als die präferierte Alternative heraus [48].

Zunächst wird allen  $m$  Kriterien  $j \in \{1, \dots, m\}$  eine genaue Gewichtung  $w_j \in \mathbb{R} : 0 < w_j \leq 1$  zugeordnet. Für die Summe aller Gewichtungen gilt:  $\sum_{j=1}^m w_j = 1$ . Darauffolgend wird bei jedem Kriterium  $j$  für jede Alternative  $i$  einzeln bewertet, inwieweit die Alternative das Kriterium erfüllt. Der Erfüllungsgrad wird dabei als Prozentsatz durch den Eintrag  $x_{i,j} \in \mathbb{R} : 0 \leq x_{i,j} \leq 1$  angegeben. Dabei kann es für eine transparente Analyse sinnvoll sein, die Erfüllungsgrade durch verschiedene Funktionen zu berechnen, um einen subjektiven Einfluss durch grobes Abschätzen zu vermeiden. Der Nutzwert  $N_{i,j}$  einer Alternative  $i$  von einem Kriterium  $j$  berechnet sich wie folgt:  $N_{i,j} = x_{i,j} * w_j$ . Die Alternative mit dem höchsten Gesamtnutzwert  $GN_i = \sum_{j=1}^m N_{i,j} \forall i \in \{1, \dots, n\}$  mit  $GN_i \in \mathbb{R} : 0 \leq GN_i \leq 1$  ist die präferierte Alternative dieser Methode.

Formal gilt: *Alternative k ist präferierte Alternative*  $\Leftrightarrow \sum_{j=1}^m N_{k,j} > \sum_{j=1}^m N_{i,j} \forall i \in \{1, \dots, n\} \setminus \{k\}$ ,  $k \in \{1, \dots, n\}$  mit  $N_{k,j} = x_{k,j} * w_j$  und  $N_{i,j} = x_{i,j} * w_j$ .

		Alternativen (kurz Alternat.)				
		Gewichtung	Alternat. 1	Alternat. 2	...	Alternat. n
Kriterien	Kriterium 1	$w_1$	$x_{1,1}$	$x_{2,1}$	...	$x_{n,1}$
	Kriterium 2	$w_2$	$x_{1,2}$	$x_{2,2}$	...	$x_{n,2}$
	...	...	...	...	...	...
	Kriterium m	$w_m$	$x_{1,m}$	$x_{2,m}$	...	$x_{n,m}$
			$\sum_{j=1}^m N_{1,j}$	$\sum_{j=1}^m N_{2,j}$	...	$\sum_{j=1}^m N_{n,j}$

**Tabelle 4:** Schema von Methode 3 (Nutzwertanalyse)

Die Nutzwertanalyse hat folgende **Vorteile**:

- ▶ Die Kriterien können mit unterschiedlichen Gewichtungen in die Berechnung eingehen.
- ▶ Für jedes Kriterium kann genau festgelegt werden, inwiefern eine Alternative dieses erfüllt. Dabei kann auch angegeben werden, wenn eine Alternative ein Kriterium gar nicht erfüllt.
- ▶ Es ist ebenfalls möglich, dass zwei oder mehrere Alternativen einem Kriterium gleich gut entsprechen.
- ▶ Die Analyse ist aufgrund der vielen Zwischenschritte sehr transparent [48].

- ▶ Durch diese Analyse kann eine Alternative als präferiert bewertet werden, die zwar weniger Kriterien erfüllt als eine andere Alternative, aber durch die Gewichtung der Kriterien den besten Gesamtnutzen erzielt [48].

Folgende **Nachteile** gehen mit der Nutzwertanalyse einher:

- ▶ Die Analyse erfordert einen hohen Zeitaufwand.
- ▶ Durch die subjektive Festlegung der Gewichtungen und Erfüllungsgrade ist die Analyse subjektiv beeinflusst [48].

#### 5.1.4 Methodenauswahl

Die Methode des direkten Vergleichsverfahrens ist ideal, um eine präferierte Alternative zu erhalten, die den meisten Kriterien entspricht. Dies beruht allerdings auf der Annahme, dass alle Kriterien gleich gewichtet sind. Sollten die Kriterien eine deutlich unterschiedliche Wichtigkeit aufweisen, würde das Durchführen dieser Methode ein verzerrtes Ergebnis liefern, das womöglich eine nicht-optimale Alternative empfiehlt und generell eine schlechte Vergleichsgrundlage für die Alternativen liefert.

Die Methode des gewichteten Rangfolgeverfahrens behebt diesen Nachteil der ersten Methode, indem die unterschiedlichen Kriterien gewichtet werden können. Dadurch ist eine deutlich differenziertere Betrachtung der Kriterien möglich. Auch fließt ein Kriterium bei jeder Alternative in das Ergebnis mit ein, wodurch ein besserer Vergleich der Ergebnisse möglich ist. Dennoch entsteht durch das erforderliche Priorisieren der Alternativen pro Kriterium eine Einschränkung, wodurch ein exakter Vergleich behindert wird. Es ist nicht ersichtlich, inwiefern eine Alternative ein Kriterium besser erfüllt als eine andere, sondern nur, dass sie es tut. Daher zielt die Methode mehr auf das Herausarbeiten einer präferierten Alternative ab als auf eine genaue Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Die Methode der Nutzwertanalyse behebt diesen Nachteil der zweiten Methode und schafft dadurch eine bessere Vergleichbarkeit. Sie setzt voraus, dass je Alternative ein Erfüllungsgrad für jedes Kriterium angegeben wird, wodurch es auch ermöglicht wird, dass mehrere Alternativen einem Kriterium gleichermaßen entsprechen. Generell weisen die Ergebnisse der verschiedenen Alternativen – die Gesamtnutzwerte – eine gute Vergleichsgrundlage auf, die genauer als die der beiden ersten Methoden ist. Auch die präferierte Alternative dieser Methode, die der Alternative mit dem höchsten Gesamtnutzwert entspricht, ist das Ergebnis einer differenzierteren Betrachtung als in der ersten oder zweiten Methode. Die Kriterien gehen mit unterschiedlichen Gewich-

tungen ein und die Alternativen haben je Kriterium einen individuellen Erfüllungsgrad. Die Methode der Nutzwertanalyse kompensiert somit einen Großteil der Nachteile des direkten Vergleichsverfahrens und des gewichteten Rangfolgeverfahrens. Dennoch muss berücksichtigt werden, dass die Nutzwertanalyse, wie auch die beiden anderen, einem subjektiven Einfluss unterliegt. Die Vergleichbarkeit und Aussagekräftigkeit der Gesamtnutzwerte hängt demnach maßgeblich von einer gewissenhaften Bewertung der Kriterien-Gewichtungen und Erfüllungsgrade ab.

Für die folgende Fallstudienanalyse wird aufgrund der genannten Vorteile die Methode der Nutzwertanalyse verwendet.

## 5.2 Fallstudienanalyse

Im Rahmen der Fallstudienanalyse werden die automatisierten Fahrzeuge der drei Fallstudien anhand der Nutzwertanalyse (vgl. Kapitel 5.1.3) auf ihre Herausforderungen hin untersucht. Ziel der Analyse ist es herauszufinden, welche automatisierten Fahrzeuge welcher Fallstudie vor den derzeit größten Herausforderungen stehen bzw. an welche Fahrzeuge welcher Fallstudie die meisten Anforderungen gestellt sind.

Die Fahrzeuge der Fallstudien werden dabei anhand von vier Kriterien analysiert: Nutzersicht (Kriterium 1), Fahrzeugtechnik (Kriterium 2), Infrastruktur (Kriterium 3) und ÖPNV (Kriterium 4). Als Bewertungsgrundlage werden einige der in Kapitel 4 erarbeiteten Anforderungen, die zu den hier genannten Kriterien passen, herangezogen. Die rechtlichen Anforderungen werden in dieser Analyse außer Acht gelassen, da diese die Fahrzeuge aller Fallstudien vor dieselben Herausforderungen stellen.

Im Folgenden wird analysiert, wie groß die Herausforderungen des Kriteriums  $j \in \{1,2,3,4\}$  sind, vor denen die automatisierten Fahrzeuge der Fallstudie  $i \in \{1,2,3\}$  stehen. Um eine mögliche Intransparenz der Analyse durch bloße Abschätzung eines Prozentsatzes für den jeweiligen Erfüllungsgrad  $x_{i,j}$  zu vermeiden, wird zur Ermittlung der Erfüllungsgrade folgende Funktion verwendet:

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{Kriterium } j \text{ stellt die Fahrzeuge der Fallstudie } i \text{ vor } \mathbf{sehr\ große} \text{ Herausforderungen} \\ 0,8; & \text{Kriterium } j \text{ stellt die Fahrzeuge der Fallstudie } i \text{ vor } \mathbf{deutliche} \text{ Herausforderungen} \\ 0,6; & \text{Kriterium } j \text{ stellt die Fahrzeuge der Fallstudie } i \text{ vor } \mathbf{einige} \text{ Herausforderungen} \\ 0,4; & \text{Kriterium } j \text{ stellt die Fahrzeuge der Fallstudie } i \text{ vor } \mathbf{wenige} \text{ Herausforderungen} \\ 0,2; & \text{Kriterium } j \text{ stellt die Fahrzeuge der Fallstudie } i \text{ vor } \mathbf{minimale} \text{ Herausforderungen} \\ 0, & \text{Kriterium } j \text{ stellt die Fahrzeuge der Fallstudie } i \text{ vor } \mathbf{keine} \text{ Herausforderungen} \end{cases}$$

Die größten Herausforderungen der automatisierten Fahrzeuge liegen neben einer zuverlässigen Objekterkennung vor allem in einer fehlerfreien Objektklassifizierung, einer unmissverständlichen Mensch-Maschine-Interaktion und einem robusten Fahrzeugsystem mit einer leistungsstarken KI (vgl. Kapitel 3.1, 3.3). Diese Aspekte stellen die Basis für einen Betrieb der autonomen Fahrzeuge dar und sind in Kriterium 2 zusammengefasst, weshalb die Gewichtung für diese Kategorie auf  $w_2 = 0,5$  festgelegt wird. Als zweitgrößte Herausforderung für eine Umsetzung der autonomen Fahrzeuge im ÖPNV kann die Vernetzung der Fahrzeuge durch die V2X-Kommunikation gesehen werden (vgl. Kapitel 3.1). Diese infrastrukturellen Aspekte sind in Kriterium 3 zusammengefasst und fließen mit einer festgelegten Gewichtung von  $w_3 = 0,3$  in die Analyse mit ein. Herausforderungen seitens der Nutzer oder des ÖPNV sind in den meisten Fällen nicht mit einem übermäßig großen Aufwand verbunden und im Vergleich zu Herausforderungen aus fahrzeugtechnischer oder infrastruktureller Sicht von geringerer Relevanz. Kriterium 1 und Kriterium 4 gehen daher mit Gewichtungen von  $w_1 = 0,1$  und  $w_4 = 0,1$  mit ein. Die Gewichtungen der Kriterien sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Kriterium $j$ :	1	2	3	4
Gewichtung $w_j$ :	0,1	0,5	0,3	0,1

**Tabelle 5:** Gewichtungen der Kriterien für die Fallstudienanalyse

Im Folgenden werden die Erfüllungsgrade der Fallstudien für jedes Kriterium ermittelt. Die gesamten Ergebnisse sind in Tabelle 6 dargestellt.

### 5.2.1 Kriterium 1: Nutzersicht

- Für **Fallstudie 1** besteht die Anforderung eines effektiven Fahrzeug-Mensch-Kommunikationskonzeptes (vgl. **ANFORDERUNG 2**). Da es sich hierbei aber um autonome Linienbusse handelt, die einem festen Fahrplan folgen, besteht ein geringerer Bedarf an einer Fahrzeug-Mensch-Kommunikation als bei den autonomen Kleinbussen der anderen Fallstudien. Dennoch kann auf eine solche Kommunikation grundsätzlich nicht verzichtet werden. Beispielsweise müssen den Fahrgästen, wie heute bereits auch schon, über entsprechende Monitore die nächsten Haltestellen angezeigt werden. Insgesamt stellt dies aber eine weniger große Herausforderung dar.

Der sichere Umgang mit personenbezogenen Daten (vgl. **ANFORDERUNG 18**) stellt eine deutlich größere Herausforderung dar. Aufgrund der hohen Anzahl an Personen in den Linienbussen und der nahen Umgebung ist ein geeigneter Umgang mit diesen Daten zwingend erforderlich und stellt die Fahrzeuge in dieser Hinsicht vor eine große Herausforderung.

Das direkte Anfahren einer Haltestelle (vgl. **ANFORDERUNG 19**) ist für die autonomen Linienbusse grundsätzlich immer gegeben, da die Fahrzeuge an festgelegten Haltestellen halten. Sollten diese einmal durch beispielsweise falschparkende Fahrzeuge blockiert sein, muss der autonome Bus kurz vor oder nach dem Falschparker halten, was insgesamt aber keine wirkliche Herausforderung für das Fahrzeug darstellt.

Eine verlässliche Auskunft über die Ankunftszeit (vgl. **ANFORDERUNG 20**) ist bei Linienbussen grundsätzlich – abgesehen von Verspätungen durch hohe Verkehrsaufkommen in den Innenstädten – immer gegeben und stellt keine Herausforderung dar.

Die Anforderung einer hohen Verfügbarkeit (vgl. **ANFORDERUNG 35**) ist für die Fahrzeuge dieser Fallstudie aufgrund ihres Linieneinsatzes eher nebensächlich.

Insgesamt stellen die Anforderungen aus Nutzersicht die autonomen Linienbusse der Fallstudie 1 vor eher wenige, überschaubare Herausforderungen. Es gilt daher  $x_{1,1} = 0,4$ .

- ▶ Für die Fahrzeuge der **Fallstudie 2** besteht eine deutlich größere Herausforderung in der Bereitstellung einer effizienten Fahrzeug-Mensch-Kommunikation (vgl. **ANFORDERUNG 2**). Die autonomen Kleinbusse müssen deutlich mehr mit den Fahrgästen interagieren als die autonomen Linienbusse, da sich die Fahrtrouten der Kleinbusse während der Fahrt ändern können und die Fahrgäste darüber in Kenntnis gesetzt werden müssen. Auch könnte ein Fahrgast während der Fahrt sein Fahrziel ändern wollen und muss dies dem autonomen Kleinbus mitteilen können – ob dem Fahrzeug direkt über einen verbauten Touchscreen-Monitor oder indirekt über die Smartphone-Anwendung. Diese Fahrzeug-Mensch-Kommunikation muss deutlich ausgeprägter als die der autonomen Linienbusse sein, weshalb diese Anforderung eine größere Herausforderung für die Fahrzeuge darstellt.

Auch in Bezug auf den Datenschutz der personenbezogenen Daten (vgl. **ANFORDERUNG 18**) stehen die autonomen Fahrzeuge vor einer großen Herausforderung. Es muss in jedem Fall gewährleistet sein, dass von den erhobenen Daten keine Rückschlüsse auf einzelne Personen gezogen werden können. Dies ist allerdings gerade aufgrund des On-Demand-Prinzips keine einfache Aufgabe. Während bei den autonomen Linienbussen der



Fallstudie 1 größtenteils Daten durch die Fahrzeugsensoren gesammelt werden, die Auskunft über den momentanen Aufenthaltsort liefern, können die autonomen Kleinbusse auch Daten über langfristige Aufenthaltsorte wie Wohnung oder Arbeit sammeln.

Das Halten des autonomen Kleinbusses an einer Position mit einer minimalen Distanz zum Wunsch-Zielort des Kunden (vgl. **ANFORDERUNG 19**) stellt für die Fahrzeuge eine wichtige Anforderung dar. Die Ermittlung solcher Haltemöglichkeiten ist eine Herausforderung für die Fahrzeuge, gerade weil es im urbanen Straßenverkehr oft zu solchen Situationen kommen kann.

Im Gegensatz zu den autonomen Linienbussen der Fallstudie 1 ist eine verlässliche Auskunft über die Ankunftszeit der Fahrgäste (vgl. **ANFORDERUNG 20**) nicht grundsätzlich gegeben. Die Fahrzeit kann durch kurzfristig abgeholte Fahrgäste variieren. Die Einhaltung aller ursprünglich ermittelten Ankunftszeiten mit einer entsprechenden Toleranz, trotz Änderungen in der Fahrtroute während der Fahrt, kann die Fahrzeuge deutlich vor Herausforderungen stellen.

Auch die Koordination der Fahrzeuge untereinander, für eine hohe Verfügbarkeit der autonomen Kleinbusse (vgl. **ANFORDERUNG 35**), stellt eine Herausforderung dar. Durch eine Erhöhung der Anzahl an Kleinbussen kann diese Herausforderung allerdings reduziert werden.

Insgesamt stellen die Anforderungen an die autonomen Kleinbusse der Fallstudie 2 eine deutliche Herausforderung für die Fahrzeuge dar und es folgt  $x_{2,1} = 0,8$ .

- ▶ Die autonomen Kleinbusse der **Fallstudie 3** ähneln in ihren Herausforderungen stark den Fahrzeugen der Fallstudie 2. So stehen sie vor den gleichen Herausforderungen eines effektiven Fahrzeug-Mensch-Kommunikationskonzeptes (vgl. **ANFORDERUNG 2**), eines sicheren Umgangs mit personenbezogenen Daten (vgl. **ANFORDERUNG 18**) und einer verlässlichen Auskunft über die Ankunftszeiten (vgl. **ANFORDERUNG 20**).

Die Anforderung an einen Halt des autonomen Kleinbusses mit einer minimalen Distanz zum Wunsch-Zielort des Kunden (vgl. **ANFORDERUNG 19**) stellt durch die Verkehrsinfrastruktur im suburbanen Raum eine etwas größere Herausforderung dar. So kann beispielsweise das Anfahren eines gewünschten Zieles aufgrund zu schlechter verkehrsinfrastruktureller Verhältnisse nicht möglich sein und der autonome Kleinbus muss einen großen Umweg fahren, um die geforderte minimale Distanz zu gewährleisten.

Eine hohe Verfügbarkeit (vgl. **ANFORDERUNG 35**) der autonomen Kleinbusse kann direkt durch die entsprechende Größe des abzudeckenden Gebietes und die Anzahl an eingesetzten Fahrzeugen beeinflusst werden.

Insgesamt stellen die Anforderungen an die Fahrzeuge aus Fallstudie 3 wie auch an die Fahrzeuge aus Fallstudie 2 eine deutliche Herausforderung dar und es gilt  $x_{3,1} = 0,8$ .

### 5.2.2 Kriterium 2: Fahrzeugtechnik

Eine zuverlässige und witterungsunabhängige Objekterkennung (vgl. **ANFORDERUNG 4**) und Objektklassifizierung (vgl. **ANFORDERUNG 5**) stellt für alle Fahrzeuge der drei Fallstudien eine sehr große Herausforderung dar. Gerade die damit verbundene maschinelle Wahrnehmung ist von zentraler Bedeutung für die autonomen Fahrzeuge und kann als ihre größte Herausforderung angesehen werden. Auch eine damit einhergehende geeignete Sensorkonfiguration und robuste Fahrzeugsysteme (vgl. **ANFORDERUNG 7**) sowie eine leistungsstarke KI (vgl. **ANFORDERUNG 23**) stellen alle autonomen Fahrzeuge vor eine große Herausforderung.

Die defensive Programmierung (vgl. **ANFORDERUNG 22**) stellt die automatisierten Fahrzeuge für einen reibungsfreien Einsatz im öffentlichen Straßenverkehr ebenfalls vor eine große Herausforderung.

- ▶ In **Fallstudie 1** spielt das Umfahren von Hindernissen (vgl. **ANFORDERUNG 6**) eine untergeordnete Rolle. Dennoch kann auf diese Anforderung nicht vollkommen verzichtet werden. Sie stellt für die autonomen Linienbusse aber eine geringere Herausforderung als für die autonomen Kleinbusse aus den anderen Fallstudien dar, welche sich dauerhaft im Mischverkehr bewegen.

Auch stellt die Deckung des Energiebedarfes (vgl. **ANFORDERUNG 9**) für die autonomen Linienbusse aufgrund ihres genau vorgegebenen Fahrplans eine kleinere Herausforderung dar. Der Linienbetrieb dieser Fahrzeuge kann an ihre jeweilige Energie-Kapazität angepasst werden, sodass diese genau festgelegte Lade- oder Tankzeiten haben. Durch eine bereits erwähnte Energieversorgung über entsprechende Oberleitungen kann diese Herausforderung für die Fahrzeuge ganz umgangen werden.

Die Anforderung einer unmissverständlichen Mensch-Maschine-Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern (vgl. **ANFORDERUNG 21**) ist grundsätzlich für jedes autonome Fahrzeug eine Herausforderung, welche es für einen sicheren Einsatz im öffentlichen Straßenverkehr bewältigen muss. Für die autonomen Kleinbusse der beiden anderen Fallstudien

ist diese Anforderung allerdings eine größere Herausforderung als für die autonomen Linienbusse. Letztere verkehren auf eigenen Fahrspuren und fahren somit grundsätzlich nicht im Mischverkehr, außer wenn sie Hindernissen ausweichen oder Umleitungen fahren müssen. Es besteht aber nicht die zwingende Notwendigkeit einer umfangreichen Mensch-Maschine-Interaktion, da die Linienbusse praktisch unter sich verkehren. Dennoch kann diese Interaktion nicht vollkommen vernachlässigt werden, da auch mit anderen Fahrzeugen oder Fahrradfahrern auf einer Busspur gerechnet werden muss.

Es ist dennoch ersichtlich, dass durch die zuvor erwähnten fahrzeugtechnischen Herausforderungen für alle automatisierten Fahrzeuge, die Fahrzeuge der Fallstudie 1 vor deutlichen Herausforderungen stehen. Es gilt daher  $x_{1,2} = 0,8$ .

- ▶ Die Fahrzeuge der **Fallstudie 2** stehen im Hinblick auf das Umfahren von Hindernissen (vgl. **ANFORDERUNG 6**) vor einer deutlich größeren Herausforderung als die autonomen Linienbusse aus Fallstudie 1. Die Situation der autonomen Kleinbusse im Mischverkehr mit nicht-automatisierten Fahrzeugen oder Fahrradfahrern ist deutlich komplexer. Wohingegen die Linienbusse aus Fallstudie 1 auf einer einprogrammierten Route fahren können, müssen sich die autonomen Kleinbusse dieser Fallstudie frei auf allen vorgeschriebenen Straßen des urbanen Raumes bewegen können und kommen somit deutlich öfter mit vor ihnen liegenden Hindernissen in Kontakt.

Auch das Decken des erforderlichen Energiebedarfes (vgl. **ANFORDERUNG 9**) ist für die autonomen Kleinbusse eine größere Herausforderung. Sie berechnen ihre Fahrtrouten während ihres Betriebes im ÖPNV kontinuierlich selbst. Die autonomen Kleinbusse müssen sich demnach ihre Tank- bzw. Ladezeiten selbst einteilen und rechtzeitig ihre Einsatzfahrten beenden.

Die Anforderung einer unmissverständlichen Mensch-Maschine-Interaktion (vgl. **ANFORDERUNG 21**) an die autonomen Kleinbusse stellt diese ebenfalls vor eine Herausforderung. Durch ihren ständigen Einsatz im Mischverkehr ist eine Kommunikation und Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern für die autonomen Kleinbusse unerlässlich.

Insgesamt stehen die Fahrzeuge der Fallstudie 2 vor sehr großen Herausforderungen und es gilt  $x_{2,2} = 1$ .

- ▶ Die autonomen Kleinbusse der **Fallstudie 3** stehen im Hinblick auf das Umfahren von Hindernissen (vgl. **ANFORDERUNG 6**), das Decken des Energiebedarfes (vgl. **ANFORDERUNG 9**) und einer entsprechenden Mensch-Maschine-Interaktion (vgl. **ANFORDERUNG 21**) vor gleich großen Herausforderungen wie die Fahrzeuge der Fallstudie 2.

Darüber hinaus stellt aber auch die Objekterkennung von und Kommunikation mit Tieren im suburbanen Raum eine Herausforderung an die autonomen Kleinbusse dar (vgl. **ANFORDERUNG 38** und **ANFORDERUNG 39**).

Insgesamt stehen die Fahrzeuge der Fallstudie 3 vor sehr großen Herausforderungen. Es folgt daher  $x_{3,2} = 1$ .

### 5.2.3 Kriterium 3: Infrastruktur

Im Rahmen der V2X-Kommunikation stehen alle automatisierten und vernetzten Fahrzeuge vor der Herausforderung, das Auslesen und Manipulieren von Daten durch Unbefugte zu verhindern (vgl. **ANFORDERUNG 12**). Diese Herausforderung wächst mit einer zunehmenden Anzahl an eingesetzten autonomen Fahrzeugen im ÖPNV und einem Ausbau der informationstechnischen Infrastruktur.

- ▶ Für die autonomen Linienbusse der **Fallstudie 1** hält sich die Herausforderung für die Erstellung und Aktualisierung von digitalen Referenzkarten in Grenzen (vgl. **ANFORDERUNG 10**). Die Linienbusse befahren nur wenige Straßen, welche deutlich leichter digitalisiert werden können als beispielsweise ein ganzes Einsatzgebiet im suburbanen Raum (wie bei Fallstudie 3). Es reicht hierbei grundsätzlich aus, dass lediglich die von den autonomen Linienbussen befahrenen Straßen in die digitale Referenzkarte übernommen werden.

Gerade für die Umsetzung von dieser Fallstudie ist die V2I-Kommunikation unerlässlich (vgl. **ANFORDERUNG 11**). Die Herausforderung für die Fahrzeuge liegt dabei in einer geeigneten V2I-Kommunikation mit den Lichtsignalanlagen auf ihren Fahrtrouten. Auch die V2V-Kommunikation mit anderen Linienbussen (vgl. **ANFORDERUNG 25**), die für die autonomen Linienbusse eine untergeordnete Rolle spielt, stellt für die Fahrzeuge eine Herausforderung dar. Allerdings ist die Herausforderung an die autonomen Linienbusse bezüglich einer entsprechenden V2X-Kommunikation geringer als für die Fahrzeuge der beiden anderen Fallstudien.

Die Anforderung der zuverlässigen Interpretation der Verkehrsschilder im Straßenverkehr (vgl. **ANFORDERUNG 27**) ist für die autonomen Linienbusse nicht von großer Relevanz. Die Fahrzeuge fahren immer auf den gleichen Straßen, deren Verkehrsschilder bereits im Vorfeld einprogrammiert werden können. Sollte es zu temporären Änderungen in der Verkehrsbeschilderung kommen, können auch diese in die Fahrzeuge einprogrammiert wer-

den, was allgemein keine große Herausforderung darstellt. Eine selbstständige Erkennung und Interpretation der Verkehrszeichen ist dennoch sinnvoll, aber nicht zwingend erforderlich.

Die sichere Fortbewegung auch bei nicht oder nur schlecht sichtbaren Fahrbahnmarkierungen (vgl. **ANFORDERUNG 40**) spielt bei den autonomen Linienbussen ebenfalls eine untergeordnete Rolle. Zum einen fahren die Busse auf eigenen, festgelegten Fahrspuren, deren Fahrbahnmarkierungen aufgrund ihrer überschaubaren Menge problemlos und regelmäßig gewartet werden können. Zum anderen können die Fahrtrouten der Busse vorab genauestens einprogrammiert werden, sodass eine kurzzeitig fehlende Fahrbahnmarkierung keine Herausforderung darstellt.

Das selbstständige Erkennen und Meiden von für das Fahrzeug unbefahrten Straßen (vgl. **ANFORDERUNG 41**) ist für die autonomen Linienbusse nicht erforderlich, da sie sich nicht frei in der Verkehrsinfrastruktur bewegen.

Insgesamt stehen die automatisierten Fahrzeuge der Fallstudie 1 vor eher wenigen Herausforderungen und es gilt  $x_{1,3} = 0, 4$ .

- ▶ Die autonomen Kleinbusse der **Fallstudie 2** stehen im Hinblick auf hochgenaue Referenzkarten (vgl. **ANFORDERUNG 10**) vor deutlich größeren Herausforderungen als die autonomen Linienbusse. Je nach Größe des Abdeckungsgebietes im urbanen Raum kann die Anzahl an zu digitalisierenden Straßen deutlich variieren. Generell stellt dies und die Aktualisierung dieser Daten gerade in größeren Städten eine Herausforderung dar.

Eine entsprechende V2I-Kommunikation mit der informationstechnischen Infrastruktur und eine V2V-Kommunikation mit anderen automatisierten Fahrzeugen (vgl. **ANFORDERUNG 11** und **ANFORDERUNG 25**) ist für die autonomen Kleinbusse unverzichtbar und eine deutlich größere Herausforderung als für die Fahrzeuge aus Fallstudie 1. Die V2X-Kommunikation beschränkt sich für die autonomen Kleinbusse nicht nur auf eine V2I-Kommunikation mit Lichtsignalanlagen, sondern auch auf eine großflächige V2V-Kommunikation mit anderen autonomen Kleinbussen im ÖPNV-Gebiet der jeweiligen Stadt.

Die Verkehrszeichenerkennung und korrekte Interpretation dieser Schilder (vgl. **ANFORDERUNG 27**) ist für die autonomen Kleinbusse eine große Herausforderung. Da nicht vorhergesagt werden kann, wo ein Kleinbus während seiner Einsatzfahrt entlangfährt, können sich die Fahrzeuge nicht allein auf die im Vorhinein einprogrammierten Daten verlassen. Kommt ein Kleinbus an einem neu aufgestellten Verkehrsschild vorbei, steht das Fahrzeug vor der Herausforderung, dieses zuverlässig zu erkennen und zu interpretieren. Nachfolgenden automatisierten Fahrzeugen könnte die Erkennung und Interpretation des

neuen Verkehrsschildes durch eine Übermittlung dieser Information anhand entsprechender V2X-Kommunikationen erleichtert werden.

Eine sichere Fahrt auch bei schlecht sichtbaren oder fehlenden Fahrbahnmarkierungen (vgl. **ANFORDERUNG 40**) ist für die autonomen Kleinbusse eine größere Herausforderung als für die Fahrzeuge der Fallstudie 1. Dennoch fahren auch diese Fahrzeuge auf vorgegebenen Straßen, deren Fahrbahnmarkierungen regelmäßig gewartet werden können. Je nach Größe des Abdeckungsgebietes variiert der Aufwand für solch eine Wartung stark, stellt dadurch für die Fahrzeuge aber eine deutlich geringere Herausforderung dar.

Das Erkennen von einer für den autonomen Kleinbus unbefahrten Straße (vgl. **ANFORDERUNG 41**) ist auch für diese Fallstudie nicht relevant und somit keine Herausforderung, da die Fahrzeuge ausschließlich auf vorgegebenen Straßen fahren.

Insgesamt stehen die autonomen Kleinbusse der Fallstudie 2 für den Einsatz im urbanen Raum somit vor einigen Herausforderung und es gilt  $x_{2,3} = 0,6$ .

- ▶ Die autonomen Kleinbusse der **Fallstudie 3** stehen aus infrastruktureller Sicht vor den größten Herausforderungen. Die Anforderung einer hochgenauen digitalen Referenzkarte (vgl. **ANFORDERUNG 10**) stellt im suburbanen Raum eine deutliche Herausforderung dar. Gerade die Aktualisierung der Kartendaten ist aufgrund der nahezu unbegrenzten Anzahl an Straßen im jeweiligen Einsatzgebiet der autonomen Kleinbusse sehr anspruchsvoll.

Auch die Ausstattung der Fahrzeuge mit entsprechenden V2X-Kommunikationsmöglichkeiten (vgl. **ANFORDERUNG 11** und **ANFORDERUNG 25**) stellt gerade im suburbanen Raum eine sehr große Herausforderung für die Fahrzeuge dar. Diese wird maßgeblich durch die Bereitstellung entsprechender Übertragungstechnologien beeinflusst. Durch die üblicherweise geringere Abdeckung der Gebiete im suburbanen Raum mit Übertragungstechnologien als im urbanen Raum der Fallstudie 2 (vgl. **ANFORDERUNG 42**), stehen die autonomen Kleinbusse der Fallstudie 3 vor deutlich größeren Herausforderungen.

Die zuverlässige Interpretation von Verkehrsschildern (vgl. **ANFORDERUNG 27**) ist für die autonomen Kleinbusse im suburbanen Raum unerlässlich. Allerdings stellt gerade die Erkennung von Verkehrszeichen in ländlichen Gebieten, mit einer unübersichtlicheren Straßenführung als in Städten, die Fahrzeuge vor Herausforderungen. Hinzu kommen dabei oft unzureichend sichtbare Fahrbahnmarkierungen (vgl. **ANFORDERUNG 40**). Durch für das Fahrzeug nicht erkennbare Fahrbahnmarkierungen steht dieses vor sehr großen Herausforderungen in seiner Querpositionierung auf der Straße. Die Herausforderung besteht dabei darin, dass sich der autonome Kleinbus weiterhin auf der richtigen Fahrspur fortbewegt, um die für ihn relevanten Verkehrsschilder erkennen zu können.

Im Gegensatz zu den Fahrzeugen der ersten beiden Fallstudien spielt das Erkennen und Meiden von für das Fahrzeug unbefahrten Straßen im suburbanen Raum (vgl. **ANFORDERUNG 41**) eine sehr große Rolle. Die autonomen Kleinbusse dieser Fallstudie bewegen sich im Gegensatz zu den anderen beiden vollkommen frei im entsprechenden Einsatzgebiet. Die Erkennung von kurzzeitig oder längerfristig nicht befahrbaren Straßen ist somit eine Herausforderung für die autonomen Kleinbusse.

Insgesamt stehen die autonomen Kleinbusse der Fallstudie 3 vor sehr großen Herausforderungen und es folgt  $x_{3,3} = 1$ .

#### 5.2.4 Kriterium 4: ÖPNV

Für einen effizienten Betrieb der automatisierten Fahrzeuge im ÖPNV stehen alle Fahrzeuge vor der Herausforderung, einen durch die defensive Programmierung bedingten Missbrauch zu verhindern (vgl. **ANFORDERUNG 29**). Diese Herausforderung besteht gleichermaßen für die autonomen Linienbusse wie auch für die autonomen Kleinbusse im urbanen und suburbanen Raum.

Genauso stehen die Fahrzeuge vor der Herausforderung, entsprechende Maßnahmen zur Erkennung und Prävention von Vandalismus zu implementieren (vgl. **ANFORDERUNG 31**).

- ▶ Für die autonomen Linienbusse der **Fallstudie 1** besteht insbesondere die Anforderung einer flexiblen Einsetzbarkeit auf allen Linien (vgl. **ANFORDERUNG 13**). Dies stellt die Fahrzeuge vor die Herausforderung, grundsätzlich auf allen Linien des ÖPNV-Liniennetzes fahren zu können.

Dafür müssen die Linienbusse nicht mit effizienten Algorithmen für die Berechnung von Fahrtrouten (vgl. **ANFORDERUNG 28**) ausgestattet sein, da diese anhand festgelegter Fahrpläne immer auf denselben Linien verkehren.

Die autonomen Linienbusse müssen grundsätzlich nicht mit anderen Linienbussen interagieren können (vgl. **ANFORDERUNG 43**), da sie unabhängig von diesen ihre eigenen Fahrpläne einhalten müssen. Für kurzfristige Anpassungen des ÖPNV-Angebotes kann es aber durchaus hilfreich sein, dass die Fahrzeuge miteinander interagieren können, beispielsweise um bei einem überfüllten Linienbus automatisch einen weiteren anzufordern.

Insgesamt stehen die automatisierten Fahrzeuge der Fallstudie 1 somit vor minimalen Herausforderungen und es gilt  $x_{1,4} = 0, 2$ .

- ▶ Die Anforderung der flexiblen Einsetzbarkeit (vgl. **ANFORDERUNG 13**) ist für die Fahrzeuge der **Fallstudie 2** automatisch gegeben, da sich die Fahrzeuge frei im urbanen

Raum bewegen, ohne einer bestimmten Linie oder einem bestimmten Gebiet zugeordnet zu sein.

Eine Herausforderung für die autonomen Kleinbusse stellt die Berechnung optimaler Routen anhand von effizienten Algorithmen dar (vgl. **ANFORDERUNG 28**). Durch das On-Demand-Prinzip müssen die Fahrzeuge während einer Einsatzfahrt regelmäßig ihre Fahrtroute ändern, um weitere Fahrgäste einsteigen lassen zu können.

Um die Gestaltung optimaler Routen zu realisieren, müssen die autonomen Kleinbusse darüber hinaus auch miteinander interagieren können (vgl. **ANFORDERUNG 43**). Die Fahrzeuge müssen sich untereinander absprechen können, welcher Kleinbus welchen Fahrgast mitnimmt, sodass letztendlich immer nur ein Kleinbus einen Fahrgast abholt. Dies stellt die autonomen Kleinbusse vor die Herausforderung, ihre Fahrtrouten mit denen der anderen Kleinbusse abzugleichen, um so ein besseres Gesamtangebot im ÖPNV zu erzielen.

Insgesamt stehen die Fahrzeuge der Fallstudie 2 vor einigen Herausforderungen und es folgt somit  $x_{2,4} = 0,6$ .

- Für die autonomen Kleinbusse der **Fallstudie 3** besteht die Herausforderung, auch in anderen Gebieten einsetzbar zu sein (vgl. **ANFORDERUNG 13**). Die Herausforderung besteht nicht in einer geänderten Einsetzbarkeit innerhalb eines Gebietes, da sich die Fahrzeuge dort wie auch die Fahrzeuge der Fallstudie 2 frei bewegen, sondern in der Einsetzbarkeit innerhalb unterschiedlicher Gebiete. Dies stellt gerade im suburbanen Raum eine deutliche Herausforderung dar.

Wie auch die Fahrzeuge aus Fallstudie 2 müssen diese Fahrzeuge über effiziente Algorithmen für eine optimale Routen-Berechnung verfügen (vgl. **ANFORDERUNG 28**). Dies stellt eine größere Herausforderung für die autonomen Kleinbusse als für die Fahrzeuge im urbanen Raum dar, da die Verkehrsinfrastruktur in ländlichen Regionen oft nicht so strukturiert wie in Städten ist.

Darüber hinaus ist es für die autonomen Kleinbusse auch erforderlich, dass diese mit anderen automatisierten Fahrzeugen des ÖPNV interagieren können (vgl. **ANFORDERUNG 43**). Dadurch bedingt, dass die Fahrzeuge den ländlichen Raum an das stationäre Liniennetz als Überbrückung der „letzten Meile“ anbinden, müssen die autonomen Kleinbusse mit den Fahrzeugen des stationären Liniennetzes interagieren können.

Insgesamt stehen die autonomen Kleinbusse der Fallstudie 3 vor deutlichen Herausforderungen und es gilt  $x_{3,4} = 0,8$ .



### 5.2.5 Auswertung

Aus den Erfüllungsgraden  $x_{i,j}$  lassen sich nun die Nutzwerte  $N_{i,j}$  sowie die Gesamtnutzwerte  $GN_i$  ermitteln, die in der Tabelle 6 zusammengefasst sind.

	Gewichtung	Fallstudie 1	Fallstudie 2	Fallstudie 3
	$w_j$	$x_{1,j} (N_{1,j})$	$x_{2,j} (N_{2,j})$	$x_{3,j} (N_{3,j})$
Kriterium 1	0,1	0,4 (0,04)	0,8 (0,08)	0,8 (0,08)
Kriterium 2	0,5	0,8 (0,4)	1,0 (0,5)	1,0 (0,5)
Kriterium 3	0,3	0,4 (0,12)	0,6 (0,18)	1,0 (0,3)
Kriterium 4	0,1	0,2 (0,02)	0,6 (0,06)	0,8 (0,08)
<b>Gesamtnutzwert <math>GN_i</math></b>		<b>0,58</b>	<b>0,82</b>	<b>0,96</b>

**Tabelle 6:** Auswertung der Fallstudienanalyse

Es ist ersichtlich, dass der Gesamtnutzwert der Fallstudie 1 am kleinsten und der Gesamtnutzwert der Fallstudie 3 am größten ist, es gilt also  $GN_1 < GN_2 < GN_3$ . Daraus folgt, dass die autonomen Linienbusse der Fallstudie 1 vor den kleinsten und die autonomen Kleinbusse der Fallstudie 3 vor den größten Herausforderungen stehen. Um eine einigermaßen genaue Aussage über die Herausforderungen der Fahrzeuge treffen zu können, wird eine Funktion zur Ermittlung des Herausforderungsgrades  $H_i$  eingeführt. Dabei wird die Funktion zur Ermittlung der Erfüllungsgrade  $x_{i,j}$  rücktransformiert; das heißt aus einem Gesamtnutzwert  $GN_i$ , der durch die Erfüllungsgrade  $x_{i,j}$  berechnet wurde, lässt sich jetzt wieder eine Aussage über die „Größe“ der Herausforderung treffen.

$$H_i(GN_i)$$

$$= \begin{cases} \text{Die Fahrzeuge der Fallstudie } i \text{ stehen vor } \mathbf{sehr\ großen} \text{ Herausforderungen,} & GN_i \approx 1 \\ \text{Die Fahrzeuge der Fallstudie } i \text{ stehen vor } \mathbf{deutlichen} \text{ Herausforderungen,} & GN_i \approx 0,8 \\ \text{Die Fahrzeuge der Fallstudie } i \text{ stehen vor } \mathbf{einigen} \text{ Herausforderungen,} & GN_i \approx 0,6 \\ \text{Die Fahrzeuge der Fallstudie } i \text{ stehen vor } \mathbf{wenigen} \text{ Herausforderungen,} & GN_i \approx 0,4 \\ \text{Die Fahrzeuge der Fallstudie } i \text{ stehen vor } \mathbf{minimalen} \text{ Herausforderungen,} & GN_i \approx 0,2 \\ \text{Die Fahrzeuge der Fallstudie } i \text{ stehen vor } \mathbf{keinen} \text{ Herausforderungen,} & GN_i \approx 0 \end{cases}$$

Im Folgenden wird die Funktion  $H_i(GN_i)$  auf die drei Fallstudien angewendet.

- ▶ Fahrzeuge der Fallstudie 1:  
 $GN_1 = 0,58 \approx 0,6 \Rightarrow$  Die Fahrzeuge der Fallstudie 1 stehen vor **einigen** Herausforderungen.
- ▶ Fahrzeuge der Fallstudie 2:  
 $GN_2 = 0,82 \approx 0,8 \Rightarrow$  Die Fahrzeuge der Fallstudie 2 stehen vor **deutlichen** Herausforderungen.
- ▶ Fahrzeuge der Fallstudie 3:  
 $GN_3 = 0,96 \approx 1 \Rightarrow$  Die Fahrzeuge der Fallstudie 3 stehen vor **sehr großen** Herausforderungen.

### 5.3 SWOT-Analyse der Fallstudien

Die SWOT-Analyse ist eine systematische Situationsanalyse, die bevorzugt zur Entwicklung von Unternehmensstrategien eingesetzt wird. Dabei werden im Rahmen der Analyse die Stärken (a.d.E. **Strengths**), Schwächen (a.d.E. **Weaknesses**), Chancen (a.d.E. **Opportunities**) und Risiken (a.d.E. **Threats**) eines gegebenen Kontextes erarbeitet. Die Analyse umfasst eine zwei-dimensionale Betrachtung: eine interne und externe Analyse. Die Chancen und Risiken leiten sich aus externen Faktoren ab und bilden die externe Analyse; die Stärken und Schwächen leiten sich aus internen Faktoren ab und bilden die interne Analyse [49].

Ziel der SWOT-Analyse ist es, einen realistischen Gesamtüberblick über jede Fallstudie zu schaffen. Auf Basis dessen können darüber hinaus Strategien für eine mögliche Umsetzung abgeleitet werden, worauf im Rahmen dieser Arbeit verzichtet wird.

#### 5.3.1 Fallstudie 1

Zu den **Stärken** der ersten Fallstudie gehört die Vermeidung des Mischverkehrs zwischen autonomen und nicht-autonomen Fahrzeugen. Dadurch stehen die Fahrzeuge dieser Fallstudie keinem komplexen Verkehrsgeschehen gegenüber. Hinzu kommt, dass für die Fahrzeuge keine komplexe Mensch-Maschine-Interaktion mit anderen, nicht-autonomen Fahrzeugen erforderlich ist.

Aufgrund der eigenen Fahrspuren der autonomen Linienbusse, dem Vorrang an Kreuzungen mit Ampelanlagen und den genau festgelegten Haltepositionen, die den Haltestellen der Busse entsprechen, wird ein sehr effizienter Betrieb der autonomen Busse im ÖPNV gewährleistet. Dafür

ist keine großflächige V2X-Kommunikation erforderlich. Grundsätzlich genügt für einen effizienten Fahrbetrieb eine V2I-Kommunikation mit einer beschränkten Anzahl an Ampeln, die sich auf den Linien der autonomen Busse befinden.

Da der Betrieb der autonomen Linienbusse dem Betrieb aktuell nicht-autonom betriebener Linienbusse ähnelt, können die Fahrzeuge dieser Fallstudie den bereits existierenden Linienbetrieb übernehmen, sodass kein neues Betriebskonzept erforderlich ist. Des Weiteren ermöglichen die elektrisch betriebenen, autonomen Linienbusse einen lokal emissionsfreien Nahverkehr im urbanen Raum.

Zu den **Schwächen** der Fallstudie zählt die notwendige Anpassung der Verkehrsinfrastruktur, da den Linienbussen eigene Fahrspuren zur Verfügung gestellt werden müssen. Dies stellt einen Eingriff in die städtische Verkehrsinfrastruktur dar und kann gerade in dicht bebauten Städten zu einer großen Herausforderung werden. Zusätzlich stellt auch die Notwendigkeit des Ausweichens vor Hindernissen auf den Busspuren eine Schwäche dar. Die autonomen Linienbusse müssen somit auch auf den vom Mischverkehr befahrenen Fahrspuren fahren können.

Ebenfalls muss für die V2I-Kommunikation der Busse mit den Ampeln eine entsprechende informationstechnische Infrastruktur aufgebaut werden.

Bedingt durch die Bindung der Busse an die vorgegebenen Fahrspuren sind die Fahrzeuge nicht flexibel und individualisieren somit nicht den ÖPNV-Betrieb. Für die Nutzer entsteht somit – abgesehen von der Verbesserung der Effizienz – kein neues Angebot.

Die Verbesserung der Effizienz ist allerdings aufgrund einer möglichen Ausnutzung der defensiven Programmierung grundsätzlich nicht gesichert, sodass es unter Umständen auch zu einer Verschlechterung der Effizienz kommen kann. Die defensive Programmierung stellt eine Schwäche aller autonomen Fahrzeuge dar.

Die **Chancen** autonomer Linienbusse spiegeln sich unter anderem in einem größeren Angebot des ÖPNV wider. Durch die nicht mehr benötigten Fahrer kann das Angebot der Linienbusse ausgeschöpft werden, sodass beispielsweise ein ganztägiges Angebot ohne notwendige Pausenzeiten der Fahrer aufgestellt werden kann. Das Angebot kann dadurch auch flexibler gestaltet werden, da die Verfügbarkeit von Fahrpersonal kein Faktor für die Fahrplangestaltung mehr darstellt. So kann das Angebot an die Nachfrage der Nutzer angepasst werden. Hinzu kommt die Chance eines effizienteren ÖPNV aufgrund des exakten Fahrplaneinhaltens der Linienbusse durch die bereits genannten Stärken.

Eine weitere Chance ist die Einführung des autonomen Fahrens in den alltäglichen Straßenverkehr. Die Gesellschaft wird so mit dem Thema des autonomen Fahrens vertraut gemacht und

kann erste Erfahrungen sammeln. Aber auch für die technische Weiterentwicklung des automatisierten Fahrens stellen die autonomen Linienbusse eine Chance dar. So können wertvolle Daten aus dem Realbetrieb gesammelt werden, von welchen letzten Endes alle automatisierten Fahrzeuge profitieren können.

Eines der **Risiken** dieser Fallstudie stellt die rechtliche Situation dar. Solange der Betrieb von autonomen Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr nicht uneingeschränkt oder zumindest für die Umsetzung dieser Fallstudie ausreichend ermöglicht wird, ist ein Einsatz der autonomen Linienbusse nicht möglich. Diesem Risiko sind grundsätzlich alle drei Fallstudien ausgesetzt. Darüber hinaus stellt auch die gesellschaftliche Akzeptanz einen Risikofaktor dar. Wird das Thema des autonomen Fahrens von den Nutzern nicht akzeptiert und abgelehnt, ist der Einsatz von autonomen Linienbussen zwecklos.

Ebenso ist die Verbesserung der Effizienz des Linienbetriebes risikobehaftet, da hierzu viele externe Faktoren mit einhergehen. Dazu zählen beispielsweise das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer im Straßenverkehr mit Hinblick auf die defensive Programmierung der Linienbusse, der Zustand der Verkehrsinfrastruktur und eine ausreichend verfügbare informationstechnische Infrastruktur. Aufgrund dieser Faktoren ist eine Steigerung der Effizienz risikobehaftet, sodass es auch zu einer Verschlechterung der Effizienz kommen kann.

Alle genannten Punkte sind in der folgenden Tabelle stichpunktartig zusammengefasst.

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Kein komplexes Verkehrsgeschehen und keine komplexe Mensch-Maschine-Interaktion durch die Vermeidung des Mischverkehrs</li> <li>▶ Effizienter Betrieb durch eigene Fahrspuren, Vorrang an Ampelanlagen und fest definierte Haltepositionen</li> <li>▶ Keine großflächige V2X-Kommunikation erforderlich</li> <li>▶ Kann an bestehenden Linienbetrieb des ÖPNV anknüpfen</li> <li>▶ Lokal emissionsfreier Nahverkehr</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Separate Busspuren notwendig</li> <li>▶ Die Fahrzeuge müssen dennoch auf die Fahrspuren des Mischverkehrs ausweichen können</li> <li>▶ Informationstechnische Infrastruktur für V2I-Kommunikation mit Ampeln notwendig</li> <li>▶ Kein Hinzugewinn an Flexibilität</li> <li>▶ (Defensive Programmierung kann ausgenutzt werden)</li> </ul>
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Größeres Angebot, da keine Fahrer benötigt werden</li> <li>▶ Effizienterer ÖPNV durch exaktes Fahrplaneinhalten</li> <li>▶ Gesellschaft mit autonomem Fahren vertraut machen</li> <li>▶ Sammeln von wertvollen Daten für die Weiterentwicklung des automatisierten Fahrens</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ (Rechtliche Situation)</li> <li>▶ Gesellschaftliche Angst vor autonomem Fahren</li> <li>▶ Keine Steigerung der Effizienz oder Verschlechterung der Effizienz aufgrund externer Faktoren</li> </ul>

**Tabelle 7:** SWOT-Analyse der Fallstudie 1

### 5.3.2 Fallstudie 2

Eine der **Stärken** der Fallstudie 2 ist der nicht notwendige Eingriff in die Verkehrsinfrastruktur. Da sich die autonomen Kleinbusse im Mischverkehr fortbewegen, müssen keine eigenen Fahrspuren eingerichtet werden. Des Weiteren fahren die autonomen Fahrzeuge ausschließlich auf einer begrenzten Anzahl an Straßen, wodurch sich eine übersichtliche und begrenzte Menge an Straßen ergibt, die für den Einsatz der Fahrzeuge instand gehalten werden müssen.

Durch die individuelle Abrufbarkeit der Fahrzeuge nach dem On-Demand-Prinzip sowie eine großflächige Abdeckung der Stadt, ermöglicht diese Fallstudie einen deutlichen Hinzugewinn an Flexibilität für die Nutzer im Stadtverkehr. Gerade im Vergleich mit dem stationären Linienbetrieb der autonomen Busse aus der Fallstudie 1 entsteht somit ein deutlich kundenfreundlicheres ÖPNV-Angebot, besonders in Bezug auf körperlich eingeschränkte Personen.

Eine der **Schwächen** dieser Fallstudie ist die Notwendigkeit einer komplexen KI. Durch das Fahren der autonomen Kleinbusse im Mischverkehr auf einer zwar beschränkten, aber dennoch großen Anzahl an Straßen, sind die Fahrzeuge auf ihr maschinelles Lernen angewiesen. Hinzu kommt, dass die Fahrzeuge mit einem umfangreichen Mensch-Maschine-Interaktionskonzept ausgestattet sein müssen. Die autonomen Kleinbusse müssen selbstständig mit den Fahrern nicht-automatisierter Fahrzeuge sowie Fußgängern und Radfahrern kommunizieren können. Diesen Schwächen sind auch die autonomen Kleinbusse der Fallstudie 3 ausgesetzt sowie grundsätzlich alle autonomen Fahrzeuge, die im Mischverkehr fahren.

Des Weiteren verlieren die autonomen Kleinbusse durch das Fahren im Mischverkehr ihren Effizienz-Vorteil gegenüber den anderen im Stadtverkehr fahrenden Fahrzeugen. Insbesondere den autonomen Linienbussen auf ihren eigenen Fahrspuren sind die autonomen Kleinbusse unterlegen. Die Effizienz der Fahrzeuge ist stark abhängig vom umgebenden Verkehr.

Darüber hinaus benötigen die Fahrzeuge komplexe Algorithmen zur Berechnung der optimalen Fahrtrouten, da die autonomen Kleinbusse selbstständig für ihre Fahrplangestaltung zuständig sind.

Für den Betrieb der autonomen Fahrzeuge ist eine stark ausgebaute informationstechnische Infrastruktur erforderlich. Die Kleinbusse sind im Rahmen ihrer V2I-Kommunikation mit der Infrastruktur und V2V-Kommunikation mit anderen automatisierten Fahrzeugen auf diese angewiesen. Dazu gehört auch die Erstellung und Aktualisierung von hochgenauen digitalen Referenzkarten, die die Fahrzeuge zum Fortbewegen im Stadtverkehr benötigen.

Eine große **Chance** dieser Fallstudie stellt eine verkehrsbedingte Entlastung im urbanen Raum und eine damit einhergehende Emissionsreduzierung in den (Innen-) Städten aufgrund der elektrisch betriebenen Kleinbusse dar. Durch das ÖPNV-Angebot, das größtenteils in jeder Straße der Stadt verfügbar ist, könnten sich viele Menschen dafür entscheiden, einen autonomen Kleinbus zu rufen, anstatt das eigene Fahrzeug zu verwenden. Dadurch würde die Anzahl an „normalen“ Fahrzeugen im Stadtverkehr sinken und der Anteil an autonomen Fahrzeugen, wie den autonomen Kleinbussen, steigen, wodurch gleichzeitig deren Effizienz steigen würde.

Dadurch, dass die autonomen Kleinbusse rund um die Uhr im Stadtverkehr auf einem Großteil der Straßen unterwegs sind, sammeln die Fahrzeuge eine sehr große Menge an Daten. Sie stellen demnach ein großes Potenzial für das Erheben von Verkehrsdaten dar, die allen übrigen Verkehrsteilnehmern von großem Nutzen sein können. So können beispielsweise Straßen mit zäh fließendem Verkehr, einem Verkehrsunfall oder Gegenständen auf der Fahrbahn von den autonomen Kleinbussen erkannt werden, welche diese Daten indirekt an die Navigationssysteme aller übrigen Verkehrsteilnehmer weiterleiten könnten.

Zu den **Risiken** gehört dennoch auch die gesellschaftliche Angst vor dem autonomen, fahrerlosen Fahren. Sollten vermehrt technische Probleme oder Unfälle der autonomen Kleinbusse vorkommen, kann dies dem Ansehen des automatisierten Fahrens schaden und die gesellschaftliche Angst vergrößern. Es ist auch zu beachten, dass individuell abrufbare Kleinbusse nach dem On-Demand-Prinzip für die meisten ÖPNV-Betreiber ein neues Geschäftsfeld darstellen, wodurch diese einen für sie neuen Markt erschließen. Sollte der ÖPNV auf diesem Markt nicht beständig sein, hätte dies ebenfalls schlechte Auswirkungen auf das Ansehen des automatisierten Fahrens.

Die genannten Punkte sind in der folgenden Tabelle stichpunktartig zusammengefasst.

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Kein Eingriff in die Verkehrsinfrastruktur notwendig</li> <li>▶ Beschränkte Anzahl an instand zu haltenden Straßen</li> <li>▶ Hinzugewinn an Flexibilität im Stadtverkehr</li> <li>▶ Kundenfreundlicheres ÖPNV-Angebot, insbesondere für körperlich eingeschränkte Personen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ (Komplexe KI erforderlich)</li> <li>▶ (Umfangreiche Mensch-Maschine-Interaktion notwendig)</li> <li>▶ Kein Effizienz-Vorteil aufgrund des Mischverkehrs</li> <li>▶ Komplexe Algorithmen für die Berechnung optimaler Fahrtrouten notwendig</li> <li>▶ Gut ausgebaute informationstechnische Infrastruktur erforderlich</li> <li>▶ Hochgenaue digitale Referenzkarten erforderlich</li> </ul>
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Verkehrsbedingte Entlastung im urbanen Raum</li> <li>▶ Emissionsreduzierung in Städten</li> <li>▶ Sammeln von (Verkehrs-) Daten für andere Fahrzeuge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Gesellschaftliche Angst vor autonomem Fahren</li> <li>▶ Ansehen des automatisierten Fahrens kann geschädigt werden</li> </ul>

**Tabelle 8:** SWOT-Analyse der Fallstudie 2

### 5.3.3 Fallstudie 3

Eine **Stärke** der dritten Fallstudie ist, dass die Fahrzeuge keiner Beschränkung an speziell ausgewählten Straßen unterliegen, sondern sich frei im suburbanen Raum bewegen können. Dadurch entsteht ein sehr hohes Maß an Flexibilität für die Nutzer im ländlichen Raum.

Darüber hinaus stellt das Angebot der individuell abrufbaren Kleinbusse eine feste Anbindung des suburbanen Raumes an die Städte dar. Die Fahrzeuge decken einen Großteil des ländlichen Raumes ab und verbinden diesen mit einem stationären Liniennetz, das den Zugang zu den Städten ermöglicht.

Zu den **Schwächen** der Fallstudie gehört die komplexe verkehrstechnische Infrastruktur im suburbanen Raum. Darunter fallen beispielsweise fehlende oder schlecht sichtbare Fahrbahnmarkierungen und unübersichtliche Straßenverläufe sowie nicht korrekt platzierte Verkehrsschilder.



Diese muss für einen effizienten Einsatz im suburbanen Raum instand gehalten werden, was je nach Größe des Abdeckungsgebietes einen sehr großen Aufwand darstellen kann. Zusätzlich ist ein großflächiger Ausbau der informationstechnischen Infrastruktur notwendig, die für eine großflächige V2X-Kommunikation benötigt wird.

Hinzu kommt die Notwendigkeit von hochgenauen digitalen Referenzkarten für eine freie Beweglichkeit der Fahrzeuge im suburbanen Raum. Die Erstellung und regelmäßige Aktualisierung dieser ist im suburbanen Raum sehr aufwendig.

Neben der Mensch-Maschine-Interaktion ist im ländlichen Raum auch eine Interaktion zwischen den autonomen Kleinbussen und Tieren erforderlich.

Eine **Chance** der Fallstudie stellt das Sammeln von Daten im suburbanen Raum für das maschinelle Lernen der Fahrzeuge und die Verbesserung der KI dar. Gerade dadurch, dass das Fahren im ländlichen Raum sehr komplex ist, können hoch informative Daten gesammelt werden, wovon alle automatisierten Fahrzeuge profitieren können und wodurch die Weiterentwicklung dieser deutlich beschleunigt werden kann.

Des Weiteren wird durch die Überbrückung der „letzten Meile“ ein neues ÖPNV-Angebot im ländlichen Raum aufgebaut. Hierdurch wird der Mobilitätsnachteil des suburbanen Raumes aufgrund einer niedrigen Angebotsdichte an ÖPNV-Verkehrsmitteln deutlich vermindert, wodurch der ländliche Raum insgesamt an Attraktivität gewinnen kann.

Darüber hinaus kann die Fallstudie zu einer verkehrsbedingten Entlastung des suburbanen Raumes führen. Durch das flexible Angebot an autonomen Kleinbussen könnten mehr potenzielle Nutzer dazu veranlasst werden, auf die Nutzung dieser Mittel des ÖPNV umzusteigen und auf ihre privaten Fahrzeuge zu verzichten.

Zusätzlich kann der Einsatz von autonomen Kleinbussen im ländlichen Raum eine flächendeckende Einführung des autonomen Fahrens einleiten. Die technische Entwicklung des automatisierten Fahrens konzentriert sich dadurch nicht nur auf Autobahnen und Städte, sondern bezieht auch den suburbanen Raum mit ein.

Als **Risiko** kann die ausbleibende Akzeptanz der autonomen Fahrzeuge von der Gesellschaft im suburbanen Raum angesehen werden. Grund dafür könnte sein, dass automatisierte, selbstfahrende Shuttle-Busse nicht dem üblichen ländlichen Bild entsprechen. Hierdurch könnten die Menschen im ländlichen Raum lieber auf ihr Fahrrad zurückgreifen oder zu Fuß gehen wollen, anstatt einen autonomen Kleinbus zu nutzen.

Auch aus fahrzeugtechnischer Sicht kann es zu unvorhersehbaren Problemen im komplexen, suburbanen Raum kommen. Hinzu kommt die Gefahr einer unzureichenden Instandhaltung der

verkehrstechnischen und informationstechnischen Infrastruktur im ländlichen Raum, wodurch die zuverlässige Einsetzbarkeit der autonomen Fahrzeuge stark beeinträchtigt werden kann.

Unter einer unzureichenden Instandhaltung der Infrastruktur würde besonders die Effizienz der autonomen Kleinbusse leiden. Sollte es zu solchen Effizienz-Einbußen kommen, könnte dadurch ein Effizienz-Nachteil entstehen, wodurch die Nutzer im suburbanen Raum dieses ÖPNV-Angebot ablehnen und stattdessen bevorzugt das Fahrrad nutzen oder zu Fuß gehen könnten.

Die folgende Tabelle enthält eine stichpunktartige Zusammenfassung aller genannten Punkte.

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Die Fahrzeuge können sich uneingeschränkt im suburbanen Raum bewegen</li> <li>▶ Sehr hohes Maß an Flexibilität für Nutzer im suburbanen Raum</li> <li>▶ Feste Anbindung des suburbanen Raumes an die Städte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Komplexe verkehrstechnische Infrastruktur im suburbanen Raum</li> <li>▶ Großflächiger Ausbau der informationstechnischen Infrastruktur notwendig</li> <li>▶ Aufwendige Erstellung und Aktualisierung digitaler Referenzkarten</li> <li>▶ „Tier-Maschine-Interaktion“ erforderlich</li> </ul>
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Sammeln von Daten im suburbanen Raum für maschinelles Lernen</li> <li>▶ Verminderung des Mobilitätsnachteils und Steigerung der Attraktivität des suburbanen Raumes</li> <li>▶ Verkehrsbedingte Entlastung des suburbanen Raumes</li> <li>▶ Flächendeckende Einführung des autonomen Fahrens</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Ablehnung der Gesellschaft gegenüber dem autonomen Fahren im ländlichen Raum</li> <li>▶ Unvorhersehbare Probleme im suburbanen Betrieb</li> <li>▶ Unzureichende Instandhaltung der verkehrstechnischen und informationstechnischen Infrastruktur</li> <li>▶ Effizienz-Nachteil</li> </ul>

**Tabelle 9:** SWOT-Analyse der Fallstudie 3

## 6 Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich der Fahrzeugtechnik

Aus den in Kapitel 4 erarbeiteten Anforderungen und den in Kapitel 5.3 erarbeiteten Schwächen der drei Fallstudien lassen sich konkrete Themen für den Forschungs- und Entwicklungsbedarf ableiten.

Die zuverlässige **Objekterkennung und Objektklassifizierung** stellt aktuell noch ein wichtiges Thema für den Forschungs- und Entwicklungsbedarf dar. Automatisierte Fahrzeuge stehen im realen Straßenverkehr einer Vielzahl von Einflussfaktoren gegenüber, die sich auf die Erkennung und Klassifizierung von Hindernissen auswirken. So darf der Einfall eines Sonnenstrahls in einen Sensor nicht als ein entgegenkommendes Hindernis identifiziert werden und das Fahrzeug zum Stillstand bringen, wie es aktuell noch vorkommt [50].

Hat das automatisierte Fahrzeug ein Hindernis erkannt, bleibt es im aktuellen Realbetrieb immer stehen. Daraus schließt sich der Bedarf des **selbstständigen Umfahrens von Hindernissen**. In aktuellen Realbetrieben von autonomen Kleinbussen ist ein sich an Bord befindender Operator für das Umfahren von Hindernissen zuständig [11]. Für einen wirklich autonomen Einsatz dieser Fahrzeuge ist eine selbstständige Bewältigung dieses Problems notwendig.

Grund dafür, dass aktuell autonome Kleinbusse im Realbetrieb nicht selbstständig ausweichen können, ist unter anderem, dass diese immer einer im Vorhinein exakt einprogrammierten Strecke folgen. Die automatisierten Fahrzeuge können sich somit nicht **frei im Straßenverkehr bewegen**. Dieser Problematik sind alle in Europa fahrenden autonomen Kleinbusse ausgesetzt [51]. Für einen wirklich autonomen Einsatz der Fahrzeuge müssen sich diese selbstständig im Straßenverkehr bewegen können, ohne dass die Notwendigkeit von vorprogrammierten Fahrstrecken besteht.

Einen weiteren Punkt stellt die **Fahrgeschwindigkeit** dar, mit der sich die autonomen Kleinbusse fortbewegen. In den meisten Test- und Realbetrieben beträgt diese um die 15 km/h. Möglich wäre von Seiten der autonomen Shuttle-Busse der Hersteller Navya und EasyMile eine Fahrgeschwindigkeit von 25 km/h [30, 52]. Ein Grund für die geringe Fahrgeschwindigkeit ist, dass bei einer höheren Geschwindigkeit nicht jedes mögliche Verkehrsszenario zuverlässig abgebildet werden kann [53]. Diesbezüglich ergibt sich ein klarer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Die **defensive Programmierung** stellt eine Problematik dar, die grundsätzlich unvermeidbar ist. Dennoch muss eine allgemein verträgliche Lösung im Sinne aller Verkehrsteilnehmer gefunden werden. Taucht vor einem sich heute im Betrieb befindenden autonomen Shuttle-Bus ein anderer

Verkehrsteilnehmer auf, verlangsamt das Fahrzeug seine Geschwindigkeit oder bleibt stehen [13]. Somit wird anderen Verkehrsteilnehmern grundsätzlich immer Vorfahrt gewährt. Diese Problematik gilt es durch Forschung und Entwicklung zu lösen.

Die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern im Rahmen der **Mensch-Maschine-Interaktion** stellt ein weiteres wichtiges Thema für die Forschung und Entwicklung dar. In den aktuellen Realbetrieben findet eine solche Kommunikation aufgrund der niedrigen Fahrgeschwindigkeiten und sehr defensiven Fahrweise noch nicht statt. Für einen realen Einsatz der Fahrzeuge im täglichen Mischverkehr ist eine Mensch-Maschine-Interaktion gerade im städtischen Verkehr zwingend notwendig.

Letzten Endes sind die autonomen Fahrzeuge auf eine leistungsstarke **KI** angewiesen. Ein wichtiger Aspekt der KI ist das maschinelle Lernen; denn um Entscheidungen im Straßenverkehr vollständig selbst treffen zu können, muss das Fahrzeug auf einen Erfahrungsstand zurückgreifen können, den es nur durch intensives maschinelles Lernen aufbauen kann [28]. Es ist demnach von entscheidender Bedeutung für die Leistungsfähigkeit der autonomen Fahrzeuge, dass diese in ihrer Entwicklungs- und Forschungsphase viel im realen Straßenverkehr unterwegs sind und so eine leistungsstarke KI entwickeln können.

Ausschlaggebend für einen langfristig effizienten Betrieb autonomer Fahrzeuge ist eine hohe **Systemrobustheit**. Um die heutigen Fahrzeugsysteme nicht zu überlasten, fahren die Shuttle-Busse mit verminderter Geschwindigkeit [53]. Durch entsprechende Weiterentwicklungen der Fahrzeugsysteme müssen die Systemgrenzen erweitert werden und es muss sichergestellt werden, dass die Fahrzeuge auch nach dem Erreichen einer solchen Systemgrenze noch sicher funktionieren.

Im Folgenden sind die genannten Themen nochmals zusammengefasst.

- ▶ Objekterkennung und -klassifizierung
- ▶ Umfahren von Hindernissen
- ▶ Nicht-vorprogrammiertes Fortbewegen in der Verkehrsinfrastruktur
- ▶ Fahrgeschwindigkeit
- ▶ Defensive Programmierung
- ▶ Mensch-Maschine-Interaktion
- ▶ KI
- ▶ Systemrobustheit

## **7 Schlusswort**

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ersichtlich, dass das automatisierte und im Speziellen autonome Fahren noch vor großen Herausforderungen steht. Je nach Anwendungsszenario existieren verschiedenste Anforderungen an automatisierte Fahrzeuge im ÖPNV, die sich voneinander unterscheiden oder ergänzen können. Aber nicht nur die automatisierten Fahrzeuge selbst, sondern auch die Infrastruktur, der ÖPNV und der Gesetzgeber stehen vor noch zu bewältigenden Herausforderungen. Eine Einführung von vollständig autonom fahrenden Kleinbussen im ÖPNV als Ablösung der aktuell verwendeten Verkehrsmittel ist daher in naher Zukunft nicht zu erwarten. Dennoch beziehen zu Forschungszwecken immer mehr ÖPNV-Betreiber automatisierte Fahrzeuge in ihren Betrieb mit ein. Dieser Einsatz von autonomen Kleinbussen fördert die Entwicklung des automatisierten Fahrens und macht die Gesellschaft mit jener Thematik vertraut, die nach und nach in die Realität übergehen wird.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz und H. Winner (Hrsg.), *Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Berlin u.a.: Springer Vieweg, 2015.
- [2] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, *kompakt<sup>2</sup>. So fahren wir morgen*. August 2017. [Online]. Available: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/kompakt-automatisiertes-fahren.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/kompakt-automatisiertes-fahren.pdf?__blob=publicationFile). [Zugriff am 20. Mai 2019].
- [3] T. M. Gasser, E. A. Schmidt, K. Bengler, F. Diederichs, F. Flemisch, E. Fuchs, R. Hoyer, M. Jipp, M. Kühn, C. Lotz-Keens, M. Meurer, N. Müller, A. Reschka, J. Ritter, W. Stankowitz, E. Zeeb, U. Chiellino, L. Eckstein, E. Fraedrich, M. Gustke, M. Hüttinger, F. Köster, B. Lenz, M. Maurer, S. Meuresch, C. Reitter, G. Riegelhuth, K.-H. Siedersberger, R. Trimpop, *Bericht zum Forschungsbedarf. Runder Tisch Automatisiertes Fahren – AG Forschung*. [Online]. Available: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/bericht-zum-forschungsbedarf-runder-tisch-automatisiertes-fahren.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/bericht-zum-forschungsbedarf-runder-tisch-automatisiertes-fahren.pdf?__blob=publicationFile). [Zugriff am 20. Mai 2019].
- [4] P. Laier und F. Hecker, *Fahrerassistenzsysteme für Nutzfahrzeuge. Technische Grundlagen für teil- und vollautomatisierte Lkw und Busse*. München: Verlag Moderne Industrie, 2018.
- [5] E. Minx und R. Dietrich, *Autonomes Fahren. Wo wir heute stehen und was noch zu tun ist*. Ladenburg: Axel Springer SE, 2015.
- [6] E. Fraedrich, L. Kröger, F. Bahamonde-Birke, I. Frenzel, G. Liedtke, S. Trommer, B. Lenz und D. Heinrichs, *Automatisiertes Fahren im Personen- und Güterverkehr. Auswirkungen auf den Modal-Split, das Verkehrssystem und die Siedlungsstrukturen*. August 2017. [Online]. Available: [https://www.e-mobilbw.de/files/e-mobil/content/DE/Publikationen/PDF/PDF\\_2017/Studie\\_AutomatisiertesFahren.pdf](https://www.e-mobilbw.de/files/e-mobil/content/DE/Publikationen/PDF/PDF_2017/Studie_AutomatisiertesFahren.pdf). [Zugriff am 20. Mai 2019].
- [7] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, *Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren. Leitanbieter bleiben, Leitmarkt werden, Regelbetrieb einleiten*. September 2015. [Online]. Available: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/broschuere-strategie-automatisiertes-vernetztes-fahren.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/broschuere-strategie-automatisiertes-vernetztes-fahren.pdf?__blob=publicationFile). [Zugriff am 20. Mai 2019].

- [8] J. S. Dangschat, *Automatisierter Verkehr – was kommt da auf uns zu?*. Januar 2018. [Online]. Available: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs41358-017-0118-8.pdf>. [Zugriff am 20. Mai 2019].
- [9] M. Sinner, *Autonome Busse: Chance oder Risiko für die Bahn?*. März 2016. [Online]. Available: <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/121393/Verkehringenieurtag.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. [Zugriff am 20. Mai 2019].
- [10] L. Böckler, *Netzwerktreffen zum automatisierten und autonomen ÖPNV*. [Online]. Available: [https://gallery.mailchimp.com/85af5eab59466beadb650246c/files/ffb1c87c-98a8-4080-9610-78397d45ee46/Beitrag\\_NW\\_Treffen\\_HH\\_Harburg.pdf](https://gallery.mailchimp.com/85af5eab59466beadb650246c/files/ffb1c87c-98a8-4080-9610-78397d45ee46/Beitrag_NW_Treffen_HH_Harburg.pdf). [Zugriff am 20. Mai 2019].
- [11] Deutsche Bahn AG, *Faktenblatt*. [Online]. Available: <https://www.deutschebahn.com/resource/blob/259942/5ff8f9ba554b7fa90cd574836614918d/Faktenblatt-autonomer-Bus-data.pdf>. [Zugriff am 30. Mai 2019].
- [12] Dr. J. C. Brandt, B. Böker, A. Bullinger, M. Conrads, Dr. A. Duisberg und Dr. S. Stahl-Rolf, *Fallstudie: Autonomer Bus Bad Birnbach*. [Online]. Available: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/A/autonomer-bus-bad-birnbach.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/A/autonomer-bus-bad-birnbach.pdf?__blob=publicationFile&v=4). [Zugriff am 29. Mai 2019].
- [13] S. Hansen und J.-K. Janssen, *Robobus. Wo und wie autonome Busse jetzt schon fahren*. 2018. [Online]. Available: <https://epaper.heise.de/download/archiv/eef982ab397b/ct.18.10.064-069.pdf>. [Zugriff am 29. Mai 2019].
- [14] „Bundesgesetzblatt“. *Gesetz zu den Übereinkommen vom 8. November 1968 über den Straßenverkehr und über Straßenverkehrszeichen, zu den Europäischen Zusatzübereinkommen vom 1. Mai 1971 zu diesen Übereinkommen sowie zum Protokoll vom 1. März 1973 über Straßenmarkierungen*. Oktober 1977. [Online]. Available: [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/text.xav?SID=&tf=xaver.component.Text\\_0&toctf=&qmf=&hlf=xaver.component.Hitlist\\_0&bk=bgbl&start=%2F%2F\\*%5B%40node\\_id%3D%27429042%27%5D&skin=pdf&level=-2&nohist=1](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/text.xav?SID=&tf=xaver.component.Text_0&toctf=&qmf=&hlf=xaver.component.Hitlist_0&bk=bgbl&start=%2F%2F*%5B%40node_id%3D%27429042%27%5D&skin=pdf&level=-2&nohist=1). [Zugriff am 7. Juni 2019].
- [15] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, *Bericht zum Stand der Umsetzung der Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren*. November 2017. [Online].

- Available: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/bericht-avf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/bericht-avf.pdf?__blob=publicationFile). [Zugriff am 20. Mai 2019].
- [16] „Bundesgesetzblatt“. *Achtes Gesetz zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes*. Juni 2017. [Online]. Available: [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/text.xav?SID=&tf=xaver.component.Text\\_0&toctf=&qmf=&hlf=xaver.component.Hitlist\\_0&bk=bgbl&start=%2F%2F%5B%40node\\_id%3D%27356170%27%5D&skin=pdf&level=-2&nohist=1](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/text.xav?SID=&tf=xaver.component.Text_0&toctf=&qmf=&hlf=xaver.component.Hitlist_0&bk=bgbl&start=%2F%2F%5B%40node_id%3D%27356170%27%5D&skin=pdf&level=-2&nohist=1). [Zugriff am 7. Juni 2019].
- [17] „Daimler“. [Online]. Available: <https://www.daimler.com/innovation/case/autonomous/rechtlicher-rahmen.html>. [Zugriff am 19. Juni 2019].
- [18] Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, Hinweis zum Genehmigungsverfahren automatisierter Shuttle-Busse für potentielle Antragssteller. März 2019. [Online]. Available: [https://vm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Da-teien/PDF/190320\\_VM-Hinweise\\_zum\\_Genehmigungsverfahren\\_automatisierter\\_Shuttle\\_f%C3%BCr\\_potentiell\\_e\\_Ast.pdf](https://vm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Da-teien/PDF/190320_VM-Hinweise_zum_Genehmigungsverfahren_automatisierter_Shuttle_f%C3%BCr_potentiell_e_Ast.pdf). [Zugriff am 20. Mai 2019].
- [19] „Bosch Mobility Solutions“. [Online]. Available: <https://www.bosch-mobility-solutions.de/de/highlights/automatisierte-mobilit%C3%A4t/automatisiertes-fahren/think/>. [Zugriff am 30. Mai 2019].
- [20] V. Johanning und R. Mildner, *Car IT kompakt. Das Auto der Zukunft - Vernetzt und autonom fahren*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [21] P. Balzer, *Fahrzeugumfeldsensorik: Überblick und Vergleich zwischen Lidar, Radar, Video*. Juli 2014. [Online]. Available: <https://www.cbcity.de/fahrzeugumfeldsensorik-ueberblick-und-vergleich-zwischen-lidar-radar-video>. [Zugriff am 28. Mai 2019].
- [22] „t3n digital pioneers“. [Online]. Available: <https://t3n.de/news/audi-a8-level-3-autonomes-fahren-837581/audi-a8-sensoren/>. [Zugriff am 9. Juni 2019].
- [23] H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [24] „Bosch Mobility Solutions“. [Online]. Available: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/left-turn-assist/long-range-radar-sensor/>. [Zugriff am 7. Juni 2019].



- [25] Robert Bosch GmbH, *Radar-based driver assistance systems*. [Online]. Available: [https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/predictive-emergency-braking-system/mid-range-radar-sensor-\(mrr\)/](https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/predictive-emergency-braking-system/mid-range-radar-sensor-(mrr)/). [Zugriff am 7. Juni 2019].
- [26] J. Ritz, *Mobilitätswende - autonome Autos erobern unsere Straßen. Ressourcenverbrauch, Ökonomie und Sicherheit*. Wiesbaden: Springer, 2018.
- [27] A. O. Ors, *Choosing the Optimum Mix of Sensors for Driver Assistance and Autonomous Vehicles*. Mai 2017. [Online]. Available: [https://blog.nxp.com/wp-content/uploads/2017/05/Ors\\_NXP\\_2017\\_Embedded\\_Vision\\_Summit\\_Final.pdf#page=2](https://blog.nxp.com/wp-content/uploads/2017/05/Ors_NXP_2017_Embedded_Vision_Summit_Final.pdf#page=2). [Zugriff am 9. Juni 2019].
- [28] W. Wahlster, *Künstliche Intelligenz als Grundlage autonomer Systeme*. 2017. [Online]. Available: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00287-017-1049-y.pdf>. [Zugriff am 30. Mai 2019].
- [29] „Navya Sensors“. [Online]. Available: <https://navya.tech/3d/models/index.html?num=0&lang=en>. [Zugriff am 12. Juni 2019].
- [30] Navya, *Autonom Shuttle. Technical Specifications*. [Online]. Available: [https://navya.tech/wp-content/uploads/documents/Specifications\\_Shuttle\\_EN.pdf](https://navya.tech/wp-content/uploads/documents/Specifications_Shuttle_EN.pdf). [Zugriff am 12. Juni 2019].
- [31] Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V., *Automatisiertes Fahren – Infrastruktur*. Mai 2016. [Online]. Available: <https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2016/Downloads/160418-Automatisiertes-Fahren-Infrastruktur.pdf>. [Zugriff am 28. Mai 2019].
- [32] T. Hoffmann, *Referat F5 – Vernetzte Mobilität*. [Online]. Available: [https://konferenz.mdm-portal.de/wp-content/uploads/2018/07/1-neu-Hoffmann-20180618\\_NationaleStelle.pdf](https://konferenz.mdm-portal.de/wp-content/uploads/2018/07/1-neu-Hoffmann-20180618_NationaleStelle.pdf). [Zugriff am 25. Juni 2019].
- [33] Verband der Automobilindustrie e.V., *Automatisierung. Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren*. VDA Magazin - Automatisierung, September 2015.
- [34] C. Kurz, *Autonome Fahrzeuge: Von Menschen und Autopiloten*. 2017. [Online]. Available: <https://av.tib.eu/media/38664>. [Zugriff am 20. Mai 2019].

- [35] Spiegel Online, *Mensch, greif ein!*. Januar 2016. [Online]. Available: <https://www.spiegel.de/auto/aktuell/google-auto-13-kritische-situationen-auf-680-000-testkilometern-a-1071800-druck.html>. [Zugriff am 16. Juni 2019].
- [36] A. Cacilo, S. Schmidt, P. Wittlinger, F. Herrmann, W. Bauer, O. Sawade, H. Doderer, M. Hartwig und V. Scholz, *Hochautomatisiertes Fahren Auf Autobahnen – Industriepolitische Schlussfolgerungen*. November 2015. [Online]. Available: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/H/hochautomatisiertes-fahren-auf-autobahnen.pdf%3F\\_\\_blob%3DpublicationFile%26v%3D1](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/H/hochautomatisiertes-fahren-auf-autobahnen.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D1). [Zugriff am 16. Juni 2019].
- [37] „Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg“. August 2018. [Online]. Available: [https://taf-bw.de/fileadmin/user\\_upload/Dateien/Sonstiges/2018-08-14\\_Uebersicht\\_digitale\\_Testfelder\\_AVF\\_BMVI.PDF](https://taf-bw.de/fileadmin/user_upload/Dateien/Sonstiges/2018-08-14_Uebersicht_digitale_Testfelder_AVF_BMVI.PDF). [Zugriff am 23. Mai 2019].
- [38] „Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur“. April 2019. [Online]. Available: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/SocialMedia/YouTube/public/2019/04/Zauberei-Nein-Autonomes-Fahren-Made-in-Germany\\_shcMTG5i3LI.html](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/SocialMedia/YouTube/public/2019/04/Zauberei-Nein-Autonomes-Fahren-Made-in-Germany_shcMTG5i3LI.html). [Zugriff am 31. Mai 2019].
- [39] Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität (IKEM), *Bericht zum Workshop Zulassung von fahrerlosen Fahrzeugen*. November 2017. [Online]. Available: [https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2017/12/Bericht\\_Workshop\\_Zulassung\\_IKEM.pdf](https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2017/12/Bericht_Workshop_Zulassung_IKEM.pdf). [Zugriff am 17. Juni 2019].
- [40] NDR, *Autonomer Bus auf Sylt gestartet*. April 2019. [Online]. Available: <https://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/Autonomer-Bus-auf-Sylt-gestartet,autonomerbus128.html>. [Zugriff am 12. Juni 2019].
- [41] „NAF-Bus“. [Online]. Available: <https://www.naf-bus.de/news-1/>. [Zugriff am 17. Juni 2019].
- [42] „OSM Local Tiles“. [Online]. Available: <http://tiles.wmflabs.org/osm/slippymap2.html>. [Zugriff am 18. Juni 2019].
- [43] „TFI Leap Card“. [Online]. Available: <https://about.leapcard.ie/about/using-leap>. [Zugriff am 20. Juni 2019].
- [44] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, *Erklärung zum G7-Verkehrsministertreffen Karuizawa, Nagano, Japan*. September 2016. [Online]. Available: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Presse/ministererklaerung-aut-fahren-deutsch.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Presse/ministererklaerung-aut-fahren-deutsch.pdf?__blob=publicationFile). [Zugriff am 20. Mai 2019].

- [45] NDR, *Teure Vandalismus-Schäden an Bussen und Bahnen*. Dezember 2018. [Online]. Available: <https://www.ndr.de/nachrichten/hamburg/Teure-Vandalismus-Schaeden-an-Bussen-und-Bahnen,vandalismus166.html>. [Zugriff am 24. Juni 2019].
- [46] „NAF-Bus“. [Online]. Available: <https://www.naf-bus.de/faq/>. [Zugriff am 23. Juni 2019].
- [47] „Gesetze im Internet“. [Online]. Available: [https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo\\_2012/\\_\\_\\_53a.html](https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/___53a.html). [Zugriff am 24. Juni 2019].
- [48] R. Wiest, *Bewertung von Ideen für Lösungen*. [Online]. Available: <https://www.wertanaly-seschulung.de/images/veroeffentlichungen/Aufsatz-Bewertungsverfahren.pdf>. [Zugriff am 24. Juni 2019].
- [49] „Methodenpool“. [Online]. Available: <https://methodenpool.salzburgresearch.at/methode/swot-analyse/>. [Zugriff am 24. Juni 2019].
- [50] O. Noffke, *BVG testet erstmals autonomen Bus im Straßenverkehr*. August 2019. [Online]. Available: <https://www.rbb24.de/panorama/beitrag/2019/08/autonomes-fahren-berlin-alt-tegel-bus-bvg.html>. [Zugriff am 20. August 2019].
- [51] J.-K. Janssen, *Die Roboter-Busse: Wie wenig selbstständig autonome Busse noch sind*. April 2018. [Online]. Available: <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Die-Roboter-Busse-Wie-wenig-selbststaendig-autonome-Busse-noch-sind-4036565.html?view=print>. [Zugriff am 19. Juni 2019].
- [52] „easymile“. [Online]. Available: <https://easymile.com/solutions-easymile/ez10-autonomous-shuttle-easymile/>. [Zugriff am 20. August 2019].
- [53] J. Kugoth, *Fahrerloser Kleinbus der BVG rollt bald durch Tegel*. August 2019. [Online]. Available: <https://www.tagesspiegel.de/berlin/autonomes-fahren-fahrerloser-kleinbus-der-bvg-rollt-bald-durch-tegel/24861888.html>. [Zugriff am 20. August 2019].